INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Marzo 2013 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

EVOLUCIÓN

¿Cómo será el *Homo extraterrestris*?

ASTROFÍSICA

IceCube, un telescopio bajo el hielo

NEUROCIENCIA

El cerebro multisensorial

DOSSIER

Horizontes CUÁNTICOS

Nuevas ideas y experimentos amplían los límites de la física cuántica



6,50 EUROS



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
Marzo 2013, Número 438

ARTÍCULOS

ZACHARY ZAVISLAK



8

13

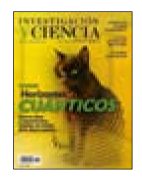


90

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA



¿Por qué el mundo macroscópico no parece obedecer las leyes de la mecánica cuántica? Un siglo después del nacimiento de la teoría, la dificultad para acomodarla en nuestra intuición clásica continúa siendo una inestimable fuente de inspiración en disciplinas tan dispares como la física fundamental, la física de materiales o la psicología. Imagen de Daniela Leitner y *Spektrum der Wissenschaft*.

redaccion@investigacionyciencia.es



Enero 2013

MATEMÁTICAS Y REALIDAD

En «Máquinas del infinito» [Investigación y Ciencia, noviembre de 2012], John Pavlus afirma que «el propio universo» se halla sometido a los límites computacionales impuestos por el problema P-NP, el cual plantea la pregunta de si los problemas cuya solución puede verificarse con rapidez son también aquellos que pueden resolverse con rapidez.

Se trata de una conclusión errónea. Nada en el mundo real (sea este lo que fuere) se encuentra limitado de manera alguna por el alcance de nuestras leyes matemáticas, físicas o cualquier otra que hayamos inventado. La matemática no es más que un instrumento útil que hemos creado para describir el universo. Si hemos hallado algo que no puede calcularse con dicha herramienta, quizá nos encontremos ante un aspecto límite de la realidad; pero puede también que no se trate sino de una restricción impuesta por las propias matemáticas.

Ted Grinthal
Berkeley Heights, Nueva Jersey

PREONES OSCUROS

El artículo «La vida interior de los quarks» [por Don Lincoln; Investigación y Ciencia, enero de 2013] trata sobre la posibilidad de que los quarks contengan en su interior otra clase de partículas, llamadas preones. Si se demostrara su existencia, ¿afectaría ello a las teorías supersimétricas y a la búsqueda de partículas de materia oscura?

Juan Torras Suriol
Tarrasa, Barcelona

Responde Lincoln: *La respuesta más simple es «no». Al igual que el comportamiento de los quarks no se vería afectado por la existencia de preones, las teorías supersimétricas o de materia oscura tampoco sufrirían modificaciones en sus aspectos esenciales.*

Por otro lado, desde un punto de vista más fundamental, la existencia de preones lo cambiaría todo. Del mismo modo que el descubrimiento de protones, neutrones y electrones transformó por completo nuestro concepto de los átomos y del mundo subatómico, el descubrimiento de los preones supondría un cambio radical en nuestras teorías. Probablemente ello afectaría también a los modelos supersimétricos y de materia oscura; sin embargo, las estrategias básicas para buscar estas partículas continuarían siendo muy similares a las actuales.

FUSIÓN Y RADIACIONES

En los artículos de enero sobre el proyecto ITER [«Las piezas ausentes del proyecto ITER», por Geoff Brumfiel, y «Apuesta de futuro», por Joaquín Sánchez; Investigación y Ciencia, enero de 2013] se destaca que la fusión es, ante todo, una energía limpia. Sin embargo, si la fusión nuclear es el mismo proceso que ocurre en el interior de las estrellas, ¿no debería emitir un reactor las mismas radiaciones peligrosas que produce el Sol?

José Álvarez García
Oviedo

Responde Sánchez: *La emisión de las reacciones de deuterio-tritio (las empleadas en el reactor) consta de neutrones de alta energía, los cuales son atrapados por la envoltura del reactor. Esta envoltura, que no sufre un calentamiento excesivo, está diseñada para evitar completamente la fuga de neutrones y proteger los imanes superconductores, que se sitúan aproximadamente a un metro de la zona donde se produce la fusión. A su vez, todo el conjunto se encuentra situado en el interior de un edificio de hormigón, por lo que la fuga de neutrones al exterior en cantidades detectables resulta prácticamente imposible.*

Por otro lado, cualquier perforación en la envoltura provocaría de manera inmediata la parada completa y segura del reactor. Ello ocurriría de manera natural y sin necesidad de disponer a tal efecto ningún sistema de emergencia, ya que en cuanto penetrase aire desde el exterior se produciría un enfriamiento inevitable del combustible (que debe estar a 200 millones de grados) y la reacción de fusión se extinguiría.

REFRACTORES EN ESPAÑA

En «La carrera por el mayor refractor del mundo» [por Stefan Binnewies; Investigación y Ciencia, enero de 2013], Wolfgang Steinicke y Stefan Binnewies narran los logros en la construcción de telescopios refractores cada vez mayores durante el siglo xix y los primeros años del siglo xx. Tal vez al lector español le interese conocer cómo se desarrolló esta fiebre por los grandes telescopios refractores en España. El primer episodio de esta carrera nacional fue la instalación del gran anteojo ecuatorial de Brunner (con un diámetro de 28 centímetros y una distancia focal de 5 metros) en enero de 1870 en el Observatorio de San Fernando. El último sería la llegada del gran anteojo de Grubb (40 centímetros de diámetro y 5 metros de distancia focal) al Observatorio de Madrid en octubre de 1921. Por su tamaño, estos instrumentos no podían equipararse a los mayores telescopios del mundo. Sin embargo, narran una bonita historia sobre cómo la astronomía experimentó un progreso espectacular en nuestro país durante aquella época, gracias a astrónomos profesionales y aficionados que consiguieron grandiosos instrumentos para sus observatorios.

José M. Vaquero
Departamento de física
Universidad de Extremadura

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



ESPACIO

Planetas de diamante

El estudio de los exoplanetas, los mundos que orbitan en torno a estrellas lejanas, todavía está en sus comienzos. Aun así, ya se han encontrado cientos que no se parecen a los que tenemos cerca: gigantes que dejan pequeño a Júpiter, diminutos guijarros abrasados por hornos estelares o hinchadas rarezas no más densas que la turba. Otros resultan familiares a grandes rasgos, pero en un análisis más preciso se revelan como mundos al revés, donde las sustancias que aquí escasean son las que abundan, y viceversa.

El carbono sirve de ejemplo. Es el componente clave de la materia orgánica y forma parte de algunos de los materiales más valiosos para la humanidad, como los diamantes o el petróleo. A pesar de esta importancia, no es un material muy común: comprende menos del 0,1 por ciento de nuestro planeta.

En otros, en cambio, puede ser tan vulgar como la tierra, hasta el punto de que carbono y tierra sean lo mismo. No hace mucho, se ha descubierto a cuarenta años luz de distancia un exoplaneta así: el carbono es allí el elemento más frecuente y las presiones del interior lo convierten, masivamente, en diamante.

El planeta 55 Cancri e podría tener una corteza de grafito de varios cientos de kilómetros de espesor. Según Nikku Madhusudhan, astrofísico e investigador posdoctoral de la Universidad de Yale, debajo de ella hay una gruesa capa de diamante. Los cristales de diamante quizás abarquen un tercio del espesor del planeta.

La singular composición de los planetas de carbono derivaría de las circunstancias en que se formaron, distintas a las de la Tierra. Habida cuenta de la composición del Sol, la nube de polvo y gas donde se crearon los planetas de nuestro sistema solar debía de contener el doble de oxígeno que de carbono. Las rocas terrestres están compuestas fundamentalmente por unos minerales ricos en oxígeno, los silicatos. En cambio, la estrella de 55 Cancri e contiene un poco más de carbono que de oxígeno; podría indicar que el planeta se formó en un entorno muy diferente al de la Tierra naciente. Madhusudhan y sus colaboradores calcularon que las propiedades generales de 55 Cancri e (más denso que un mundo acuático, pero menos que uno compuesto de minerales como los de la Tierra) se ajustan a las de un planeta de carbono. Los investigadores publicaron sus resultados el 10 de noviembre de 2012 en *Astrophysical Journal Letters*.

Las formas de vida de un planeta de carbono, en caso de que existan, serían muy diferentes de los organismos terrestres, que dependen del oxígeno. El preciado oxígeno sería allí valioso como combustible, de la misma forma que los seres humanos codician los hidrocarburos de la Tierra, afirma Marc Kuchner, del Centro de Vuelos Espaciales Goddard de la NASA. Hasta el cortejo sería muy diferente. «Un anillo de diamantes no resultaría impresionante en absoluto», dice Kuchner. «En cambio, que el pretendiente se presentase con un vaso de agua, eso sí que emocionaría».

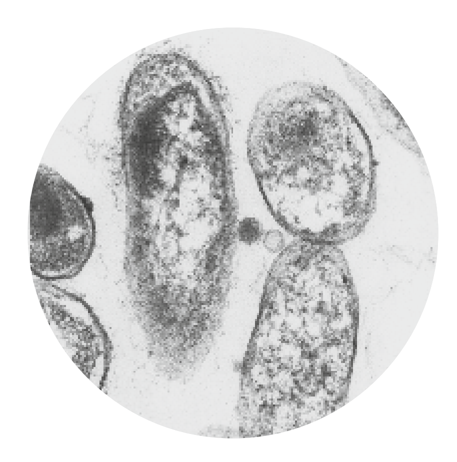
—John Matson

RON MILLER

MICROBIOLOGÍA

Patógenos ocultos

Una idea que ha estado esbozándose durante años entre los veterinarios también atrae ahora el interés de los médicos: ¿es posible que las bacterias que causan la enfermedad por arañazo de gato, un trastorno generalmente leve, con síntomas parecidos a los de la gripe, provoquen también el síndrome de fatiga crónica? Décadas de informes clínicos sugieren la existencia de algún tipo de asociación entre las infecciones de *Bartonella* y la fatiga, cefalea crónica, entumecimiento, dolor y deficiencia cognitiva. Sin embargo, se sigue sin dar con una respuesta clara.



Investigaciones recientes han encontrado fragmentos del ADN de la bacteria *Bartonella* en el 41 por ciento de 296 pacientes examinados por un reumatólogo. Muchos de ellos habían acudido a numerosos especialistas sin encontrar alivio para sus síntomas. Estos resultados, descritos en mayo de 2012 en la revista *Emerging Infectious Diseases*, fueron criticados en dos cartas al director publicadas el pasado mes de noviembre. Expresaban su disconformidad con los criterios de inclusión de los pacientes y con el umbral, demasiado bajo, a partir del cual se consideraba que había infección. «Debemos ser precavidos antes de atribuir sin pruebas sólidas las enfermedades *x*, *y* o *z* a una infección de *Bartonella*», afirma Christina Nelson, epidemióloga de los Centros de Control y Prevención de Enfermedades de los Estados Unidos; añade que los resultados del estudio eran difíciles de interpretar.

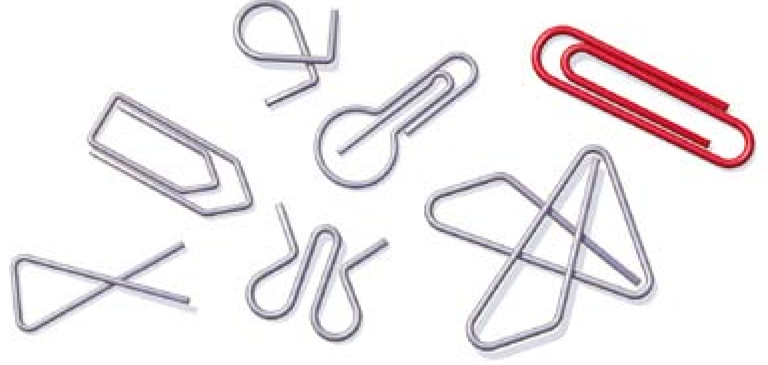
El asunto se complica por la esquiva biología del patógeno: para que no se lo detecte dentro del animal portador, cambia las proteínas de su superficie y se esconde dentro de los vasos sanguíneos. Además, modifica su estrategia dependiendo de si se encuentra en un mamífero, como un perro o un gato, o en un insecto vector, como una pulga o una garrapata. Aún no conocemos ni siquiera la punta del iceberg en lo relativo a la bacteria *Bartonella*, afirma Jane Koehler, profesora de medicina de la Universidad de California en San Francisco.

—Marissa Fessenden

CORTESÍA DE RICARDO MAGGI, UNIVERSIDAD ESTATAL DE CAROLINA DEL NORTE, COLEGIO DE MEDICINA VETERINARIA, LABORATORIO DE MÉTODOS ÓPTICOS Y ELECTRÓNICOS AVANZADOS (*bacteria*); GEORGE RETSECK (*clips*)

HISTORIA DE LA TÉCNICA

El clip sujetapapeles



La necesidad de mantener unidas hojas de papel de forma más o menos permanente se presentó desde que los chinos inventaron este material en el primer o segundo siglo de nuestra era. Aun así, según el Museo de las Primeras Oficinas, el primer clip sujetapapeles de alambre plegado no se patentó hasta 1867, por un tal Samuel B. Fay. La icónica figura del clip Gem (de Gem Office Products Company) que hoy conocemos no apareció hasta 1892. Nunca fue patentada. Henry Petroski, historiador de la técnica, ha escrito que el invento de Fay tuvo que esperar a que se dispusiera de alambre adecuado y de maquinaria capaz de plegarlo con la rapidez suficiente para que una caja de sujetapapeles pudiera venderse por unos céntimos.

Los orígenes, tanto del clip como de la máquina que los fabrica, se remontan a la fabricación de alfileres. Los oficinistas de principios del siglo XIX sujetaban sus papeles —en sentido literal— con alfileres; todavía hoy se anuncia en los catálogos de material de oficina un tipo de alfiler conocido como alfiler de tipo T. La maquinaria de la era victoriana había resuelto ya el problema de convertir, de forma económica, alambre en alfileres; adaptar la máquina para que plegara el alambre no resultó muy difícil, y este reajuste permitió que una pléyade de ingeniosos plegadores de alambre soñasen con hacer caja a lo grande.

En nuestros días están disponibles en el comercio sujetapapeles de todo tipo: de plástico moldeado, de alambre con revestimiento plástico de colores, e incluso unas láminas semicirculares de aluminio que pliegan los ángulos superiores de los papeles (y permiten exhibir un emblema o un diseño favorito). Y aún se encuentran alfileres de tipo T, clips búho, broches aprietapapeles, clips ideales y muchos otros tipos. Tomados en conjunto, han llegado a abrirse paso hasta cierto punto en el negocio de los clips tradicionales.

Pero antes de que envíe usted un boceto de un diseño nuevo y más perfecto a Gem Office Products, tenga en cuenta lo siguiente: el clip Gem puede arañar o desgarrar el papel, en la caja puede engancharse en otros clips, y si se le fuerza demasiado, deja escapar los papeles que se pretendía mantener juntos. En cierta ocasión, la compañía calculó que recibía unas 10 cartas al mes proponiendo variantes en el diseño. No obstante, lo que casi todos entienden por un sujetapapeles es, sencillamente, el clip Gem. Su posición en la cultura oficinesca es tan firme como la del teclado «qwerty».

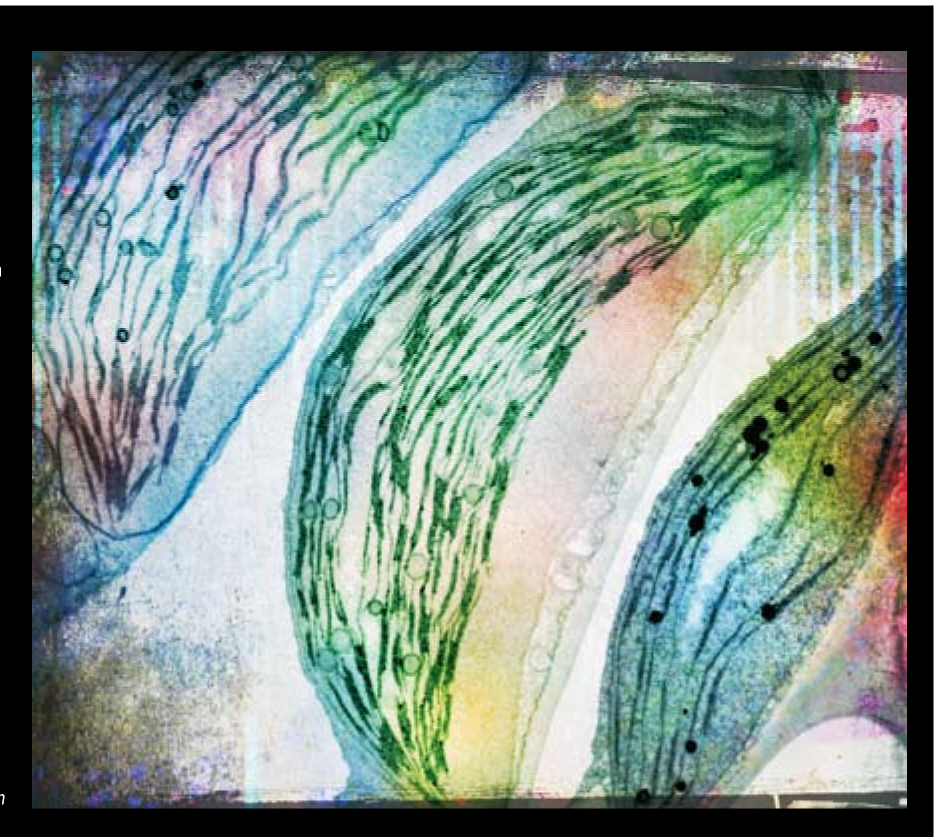
—Peter Brown

¿QUÉ ES ESTO?

Células en su sazón: Un grupo de investigadores de la Universidad de Leicester, en Inglaterra, ha descubierto una nueva forma de regular el desarrollo de las plantas. R. Paul Jarvis y su equipo sometieron plantas de *Arabidopsis thaliana*, un organismo modelo de la familia de la mostaza, a un cribado génico para descubrir los genes que afectaban a los cloroplastos, las estructuras donde se produce la fotosíntesis en las células vegetales.

Un cloroplasto saludable (*centro*) está formado por miles de proteínas. Una de ellas ordena a las demás; cuando los cloroplastos carecen de esta guía se atrofian, su desarrollo no es bueno (*derecha*). En el número del 2 de noviembre de 2012 de la revista *Science*, sin embargo, el grupo de Leicester identifica un gen, denominado *SP1*, que tras sufrir una mutación puede contrarrestar la falta del factor de ordenación (*izquierda*). Jarvis afirma que ese gen es importante en el control del desarrollo de las plantas, en particular cuando los cloroplastos «sufren grandes cambios, como durante la maduración de la fruta». Está comprobándolo en los tomates con su grupo de investigación; si tienen éxito, empezarán a explorar cómo se podría aprovechar el hallazgo para beneficiar a agricultores y consumidores.

—Ann Chin



ASTRONOMÍA

Polémica estelar

Una supernova de tipo Ia es, quizás, el colmo de la traición: una estrella roba material de una estrella compañera, alcanza la masa crítica, se hace inestable y desencadena una explosión nuclear con suficiente potencia para pulverizar a su víctima.

El culpable en estos casos está muy claro: las supernovas de tipo Ia surgen de las explosiones catastróficas de las pequeñas y densas estrellas conocidas como enanas blancas. En cambio, la identidad de las víctimas permanece en la sombra. Se creía que eran o estrellas de la secuencia principal parecidas al Sol o estrellas gigantes. Algunos estudios recientes han señalado que un mecanismo menos conocido, las parejas de enanas blancas en las que una devora a su compañera orbital antes de explotar como supernova, podría desempeñar un papel importante.

Un estudio publicado el 27 de septiembre en *Nature* apoya esta última posibilidad y concluye que solo una minoría de las supernovas de tipo Ia tiene que ver con estrellas de la secuencia principal o con estrellas gigantes. Jonay González Hernández, del Instituto de Astrofísica de Canarias, y sus colaboradores buscaron restos de una estrella víctima que pudiera haber intervenido en la supernova Ia que se vio en la Tierra en el año 1006. No encontraron nada. La ausencia de una estrella compañera superviviente parece descartar la participación de una gran estrella, porque el núcleo de una estrella de ese tipo habría sobrevivido a la explosión y debería seguir siendo visible actualmente. Una enana blanca, en cambio, no habría dejado ningún resto tras de sí. Uniendo esto a los datos de otras búsquedas de supervivientes de supernovas, generalmente sin éxito, los investigadores estiman que menos del veinte por ciento de las supernovas de tipo Ia se producen conforme al escenario tradicional.

El astrónomo Andrew Howell, de la Red Global de Telescopios Observatorio Las Cumbres, en Santa Bárbara, California, afirma que la cifra del veinte por ciento es una «gran exageración». Señala que una estrella normal, de un tamaño algo inferior al Sol, tampoco dejaría restos detectables tras de sí y cumpliría los requisitos de una posible compañera de la supernova de 1006.

—John Matson



Restos de la supernova del año 1006.

CORTESÍA DE PAULA TÖPEL/QIHUA LING Y R. PAUL JARVIS, UNIVERSIDAD DE LEICESTER (*cloroplastos*); RAYOS X: NASA/CXC/RUTGERS/G.CASSAM-CHENAÏ, J. HUGHES ET AL.; ONDAS DE RADIO: NRAO/AUI/NSF/GBT/VLA/DYER, MADDALENA & CORNWELL; ÓPTICO: MIDDLEBURY COLLEGE/F. WINKLER, NOAO/AURA/NSF/CTIO SCHMIDT & DSS (*supernova*)

FÍSICA

La época perdida

Unos instantes después de la gran explosión (*Big Bang*), el universo conoció un período de expansión muy rápida al que se da el nombre de «inflación cósmica». Durante este lapso, según la cosmología estándar, pequeñas perturbaciones de energía dieron origen a las galaxias y demás estructuras a gran escala que vemos hoy. Pero no se sabe cómo se formaron esas perturbaciones. Tres físicos afirman que la clave para resolver el enigma reside en la gravedad cuántica, una teoría que aún se encuentra en sus primeros pasos; en ella, la gravedad exhibe la misma «incertidumbre» borrosa que caracteriza a la física subatómica.

La cosmología estándar, basada en la teoría de la relatividad general de Einstein, no puede explicar el origen de las perturbaciones de energía porque a escalas muy pequeñas ya no es aplicable. Durante el período infinitesimalmente breve, la «época de Planck», que precedió a la inflación cósmica, la totalidad del universo conocido se apiñaba en una región muchos órdenes de magnitud más pequeña que un átomo. Si retrocedemos tanto en el tiempo, la relatividad predice cosas absurdas, como una densidad de energía infinita.

Para ampliar el alcance de la teoría de Albert Einstein a condiciones tan extremas, algunos investigadores han ido desarrollado una teoría denominada «gravedad cuántica de bucles». Desde la década de 1980, Abhay Ashtekar, que trabaja actualmente en la Universidad del Estado de Pensilvania, ha estado modificando las ecuaciones de Einstein para introducir en ellas conceptos cuánticos. Una de las consecuencias es que el propio espacio, en lugar de ser un telón de fondo uniforme, se compondría de unas unidades discretas, o «bucles», y su estructura microscópica fluctuaría entre múltiples estados simultáneos. En los últimos años se ha descubierto que, si la gravedad cuántica de bucles es correcta, lo que es mucho decir, ya que no hay pruebas empíricas de ello, la gran explosión habría sido más bien un «gran rebote» tras el colapso de un universo anterior.

El equipo de Ashtekar afirma ahora que ha salvado, mediante una extensión de las técnicas de la gravedad cuántica de bucles, la brecha entre el gran rebote, que se habría producido en las condiciones reinantes en la época de Planck, y el comienzo de la inflación cósmica. Ahora, según sus cálculos, puede explicar esas perturbaciones cruciales sin las cuales no estaríamos aquí: serían el resultado natural de las fluctuaciones cuánticas existentes en el momento del gran rebote.

Las predicciones del equipo, por otra parte, muestran ligeras variaciones con respecto a las que se derivan de la inflación cósmica tradicional; cabría comprobarlas empíricamente mediante futuras observaciones sistemáticas de la estructura cósmica, señala Ashtekar.

Estos resultados, que se han publicado en *Physical Review Letters*, extienden la inflación cósmica hasta la escala de Planck de un modo, según Ashtekar, carente de contradicciones internas.

La conclusión de que la gravedad cuántica habría dejado una huella en las estructuras cósmicas a gran escala del presente resulta «atractiva y sorprendente», afirma Jorge Pullin, de la Universidad del Estado de Luisiana, experto en gravedad cuántica de bucles que no participó en la investigación.

Neil Turok, director del Instituto Perimeter de Física Teórica de Ontario, afirma que el equipo aún necesita «hipótesis artificiales», a las que se fuerza para aplicarlas a un momento anterior al comienzo de la inflación cósmica. La gravedad cuántica de bucles «tiene muchas ideas interesantes», dice Turok, «pero no es todavía una teoría que haya que tomarse con demasiada seriedad a la hora de hacer predicciones».

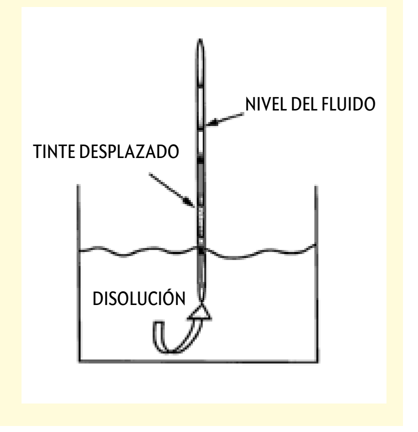
—Davide Castelvecchi

PATENTES

La ketamina, el rohipnol y el gammahidroxibutirato (GHB) son drogas de las que se llama «de violación en la cita»: hacen que las víctimas no se resistan y sean vulnerables ante un asalto sexual. Para detectar más fácilmente estos compuestos en una bebida, George Murray, científico jefe de Raptor Detection Technologies, y sus colaboradores se han valido de la química de polímeros.

La patente número 8.241.575 describe un dispositivo fino y hueco forrado con estructuras poliméricas que albergan, en cavidades que se complementan con las moléculas de la droga (técnica que recibe el nombre de «impresión molecular»), versiones de estas marcadas con tinte. Cuando se introduce el tubo en una bebida adulterada, el líquido asciende por capilaridad y las moléculas marcadas con tinte se intercambian con las de la bebida. En una muestra con resultado positivo, la bebida que hay dentro del tubo cambia rápidamente de color. El nuevo color va subiendo por la caña; la persona que iba a bebérsela queda así alertada. El método de Murray construye pieza a pieza las unidades del polímero; se consigue de esa forma un control exacto sobre el número de lugares de enlace químico dentro del dispositivo. Las disoluciones con más moléculas de la droga harán que el tinte se desplace hasta una altura mayor dentro del tubo: la altura a la que llega el cambio de color responde a la concentración.

El método vale también para detectar otros productos químicos; basta con integrar la molécula de que se trate en la estructura plástica. La empresa para la que trabaja Murray, que ya comercializa polímeros con impresión molecular como detectores de explosivos, posee la licencia de fabricación del dispositivo que previene violaciones. *—Marissa Fessenden*



THOMAS FUCHS (*ilustración*); OFICINA DE PATENTES Y MARCAS REGISTRADAS DE EE.UU. (*dispositivo sensor*)

TECNOLOGÍA

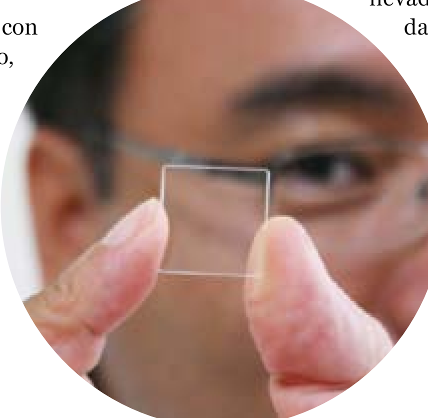
Memorias de datos de larguísima duración

La mayor parte de las instituciones culturales y laboratorios de investigación siguen utilizando cintas magnéticas para archivar sus colecciones. Hitachi ha anunciado recientemente un dispositivo que no solo es más duradero que ese formato a la antigua usanza, sino también que los CD, DVD, discos duros y MP3.

La gran compañía electrónica colaboró con Kiyotaka Miura, de la Universidad de Kyoto, para desarrollar unas finas láminas de vidrio de cuarzo «casi eternas» que, según Hitachi, conservan información durante cientos de millones de años sin que apenas se degrade.

El prototipo está formado por un cuadrado de cuarzo de dos centímetros de ancho y dos milímetros de espesor. Alberga cuatro capas de puntos inscritos por un láser que genera pulsos de luz brevísimos, de solo unos femtosegundos de duración. Los puntos representan información en lenguaje binario, un formato que debería ser comprensible incluso en el futuro lejano y que puede leerse con un microscopio óptico básico. Como las capas están integradas en el interior del material, la erosión superficial no las afecta.

El medio tiene una densidad de almacenaje un poco superior a la de un CD. Sería posible añadir capas adicionales, para aumentar la densidad. En cualquier caso, lo más notable de una memoria de este tipo es su durabilidad. Es resistente al agua, a los productos químicos y a la intemperie, y no sufrió daños al ser expuesta en una prueba a una temperatura de mil grados durante dos horas. Los resultados del experimento han llevado a Hitachi a concluir que los datos guardados en el cuarzo podrían durar cientos de millones de años.



Nueva memoria de datos de Hitachi.

«Si fuese posible fabricar tanto los lectores como los dispositivos de grabación con un coste razonable, los sistemas de memoria y archivos podrían cambiar mucho», afirma Ethan Miller, director del Centro de Investigación sobre el Almacenamiento Inteligente de Datos, de la Universidad de California, Santa Cruz. Este nuevo medio de almacenamiento de datos sería ideal para salvaguardar la información más importante de una civilización, el patrimonio de los museos o los textos sagrados. La cuestión es si el mundo tal como lo conocemos durará tanto. «Pangea se dividió hace menos de unos cientos de millones de años», añade Miller. «Muchas rocas con base de cuarzo de aquella época son ahora arena en nuestras playas. ¿Tendrían estas memorias de cuarzo un destino diferente?»

—Timothy Hornyak

EVOLUCIÓN

Oídos de insecto

En un llamativo ejemplo de cómo dos seres sin relación entre sí pueden desarrollar evolutivamente rasgos similares, un grupo de investigadores ha descubierto que un saltamontes de la selva tropical posee oídos curiosamente similares a los de los humanos y otros mamíferos, aunque su órgano auditivo se aloja en el recodo de sus patas delanteras.

El insecto, un ortóptero con cara amarillo-anaranjada (*Copiphora gorgonensis*) de la isla Gorgona en Colombia, tiene estructuras auditivas similares al tímpano y a la cóclea humanos. Cuando las ondas sonoras se acercan a las patas del insecto, hacen vibrar una fina membrana parecida a nuestro tímpano. Esta membrana transforma las amplias ondas de presión del aire en pequeños movimientos, más potentes, en otra estructura denominada la placa cuticular. La placa, a su vez, crea perturbaciones en una cámara llena de fluido similar a una cóclea humana desplegada. En el interior de esta cámara, las células sensoriales se hallan dispuestas como en un teclado, en orden descendente de la frecuencia a la que son sensibles, como sucede en los humanos.

El oído que *C. gorgonensis* desarrolló evolutivamente podría ayudar al insecto a evitar a depredadores como los murciélagos, afirma Fernando Montealegre-Z, biólogo sensorial que trabaja actualmente en la Universidad de Lincoln, en Inglaterra. Montealegre es el autor principal del estudio, que apareció en la revista *Science*. El descubrimiento ofrece otra muestra llamativa de evolución convergente, según Ronald R., profesor de neurobiología en la Universidad Cornell, que no participó en el estudio.

La eficiencia de ese minúsculo sistema podría inspirar a los ingenieros para crear microsensores basados en el diseño del oído del insecto, para su uso en audífonos, por ejemplo. Esto sensores podrían ser más resistentes, de menor tamaño y más sensibles, lo cual podría impulsar aplicaciones en las que aún no hemos pensado.

—Marissa Fessenden



CORTESÍA DE PLANNING OFFICE OF THE CENTRAL RESEARCH LABORATORY, HITACHI, LTD. (*memoria de datos*); CORTESÍA DE FERNANDO MONTEALEGRE-Z, UNIVERSIDAD DE LINCOLN (*insecto*)

SALUD

A salvo de los escorpiones

A lo largo de los últimos años, los investigadores mexicanos se han convertido en los líderes mundiales en la creación de medicamentos para el tratamiento de picaduras de arañas y serpientes venenosas. Varios de sus remedios están consiguiendo la aprobación de la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos de los Estados Unidos (FDA), así, por ejemplo, el antisuero para el veneno de escorpión Anascorp, aprobado por la FDA en 2011, o unos antídotos para el veneno de la araña viuda negra, cuyos ensayos clínicos se hallan en una fase avanzada.

Los antisueros están entre los medicamentos más antiguos del arsenal farmacéutico. Los primeros se elaboraron a finales del siglo XIX en el Instituto Pasteur, de Francia, y desde la década de 1930 la compañía farmacéutica Merck los fabrica para las picaduras de la viuda negra. Merck, sin embargo, limitó su distribución en el año 2009, debido a los efectos secundarios y a las reducidas ventas. Los compuestos que contrarrestan el veneno de escorpiones y serpientes también han sufrido una cierta escasez. El equipo de la Universidad Autónoma de México dirigido por el biólogo molecular Alejandro Alagón ha desarrollado ahora una nueva generación de antisueros, más segura y cuya producción resulta más barata.

El método está basado en el del siglo XIX: se inyecta el veneno en animales que tienen fuertes defensas naturales contra la toxina. Después, se recogen y se purifican los anticuerpos, moléculas con forma de Y que unen su extremo bifurcado al veneno y lo neutralizan. En el caso de los anticuerpos que contrarrestan las picaduras de la viuda negra, la parte inferior de la Y puede interactuar con el cuerpo humano y provocar una reacción negativa que, en raras ocasiones, tiene un resultado letal. Aunque estos efectos secundarios son poco frecuentes, muchos médicos prefieren no utilizar el antisuero de Merck. Las picaduras de la viuda negra causan dos días de dolor que deja baldado, pero no suelen resultar letales, de manera que a menudo solo tratan los síntomas.

Alagón y su equipo perfeccionaron la antigua fórmula eliminando químicamente la parte inferior del anticuerpo del antisuero, lo que convertía la Y en una V y reducía así el riesgo de efectos secundarios. Alagón afirma que la nueva fórmula para picaduras de la viuda negra es más segura que la antigua y más barata que una estancia en el hospital, ya que puede eliminar los síntomas en treinta minutos.

Como la producción de los nuevos antisueros resulta bastante barata, el laboratorio de Alagón cree que su precio podría ser asequible en África, donde muchas empresas farmacéuticas no ven que haya un mercado para este tipo de productos.

—Erik Vance

PHOTO RESEARCHERS, INC. (*escorpión*); CERN (*fotografía aérea*)

AGENDA

CONFERENCIAS

9 de marzo
Premio Nobel de física 2012: los *Gedankenexperimente* de la mecánica cuántica hechos realidad
Jordi Mompart, Universidad Autónoma de Barcelona
Ciclo «Los sábados de la física»
Facultad de Ciencias y Biociencias
Universidad Autónoma de Barcelona
Bellaterra
www.uab.cat/departament/fisica > Divulgación

12 de marzo
Neuroeducación: solo se puede aprender aquello que se ama
Francisco Mora Teruel, Universidad Complutense de Madrid
Clausura del curso «Cerebro. Viaje al interior»
Parque de las Ciencias, Granada
www.parqueciencias.com

21 de marzo
Las veredas de la antropología aplicada
María Jesús Buxó, Universidad de Barcelona
Residencia de Investigadores del CSIC
Barcelona
www.residencia-investigadors.es

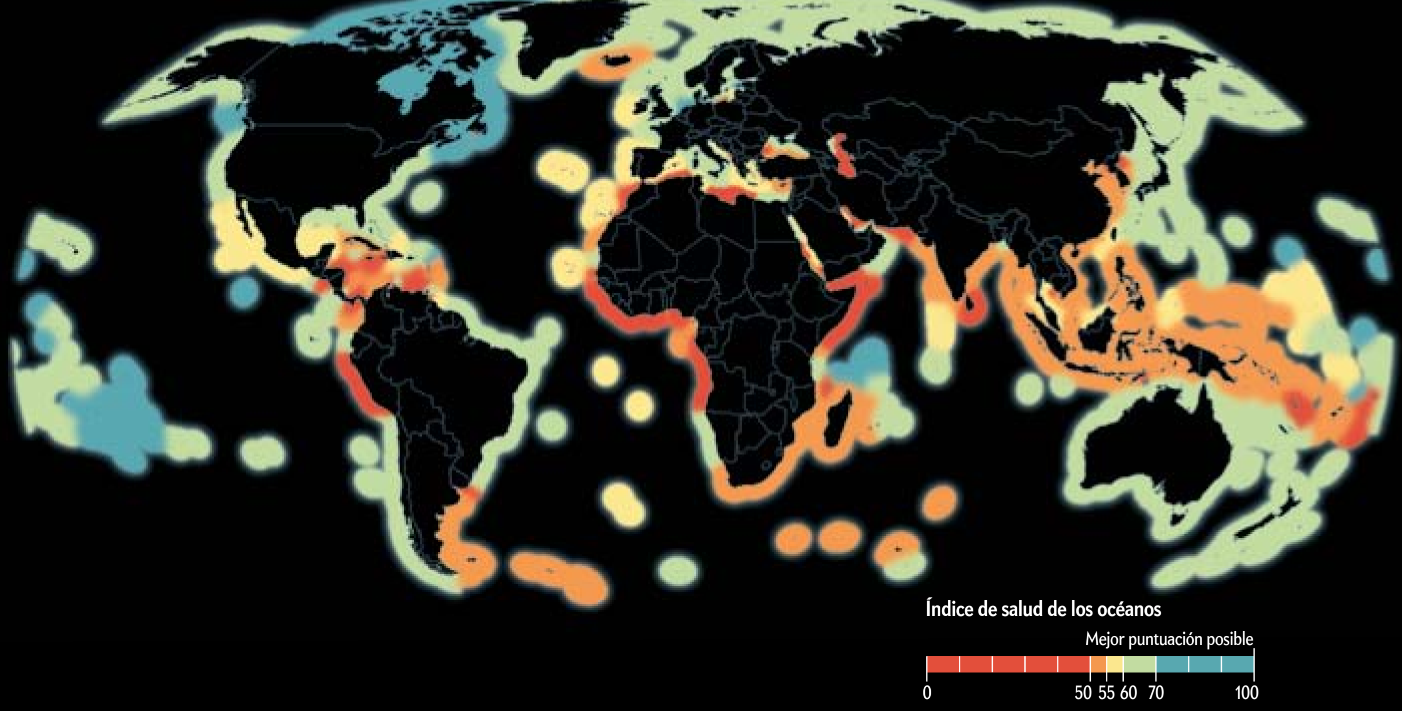
OTROS

7, 14 y 21 de marzo - Ciclo de conferencias
El bosque que habla
Museo de la Evolución Humana
Burgos
www.museoevolucionhumana.com

Del 9 al 23 de marzo – Ciclo de conferencias
El instrumento científico más grande jamás construido
Cosmocaixa
Barcelona
www.obrasocial.lacaixa.es



13 de marzo – Café científico
¿Cómo se adaptan a los cambios los animales de alta montaña? Las marmotas y sus vecinos
Bernat Claramunt, Centro de Investigación Ecológica y Aplicaciones Forestales
Casa Orlandai
Barcelona
www.casaorlandai.cat



MEDIOAMBIENTE

¿Están sanos los océanos?

La primera evaluación científica del estado de salud de los mares muestra que están limpios, pero mal gestionados

A menudo, oímos llamamientos en defensa de la «salud oceánica». Sin embargo, esa «salud» no pasaba de ser una metáfora, puesto que los científicos no tenían forma de medirla. Hasta hace poco. Más de sesenta investigadores de distintas especialidades e instituciones, entre ellas el Centro Nacional para el Análisis y Síntesis Ecológicos (NCEAS) de la Universidad de California en Santa Bárbara, han creado con este propósito el Índice de Salud de los Océanos. Esta herramienta analiza el estado de las aguas circundantes de 171 países y territorios costeros. La puntuación total de cada país es el resultado de la media de sus puntuaciones en relación a diez objetivos públicos importantes para la salud oceánica, entre ellos el aprovisionamiento sostenible de alimentos, las actividades recreativas, las oportunidades pesqueras y la biodiversidad.

El índice, publicado en agosto de 2012 en *Nature*, no es una medida del grado de limpieza de los océanos, sino que evalúa la sostenibilidad con la que el mar proporciona todo lo que la gente necesita. Los objetivos corresponden a una medida universal del estado de un ecosistema; los diez deben cumplirse para que los mares de un país puedan considerarse saludables, aunque la importancia relativa de cada uno de ellos varía de un lugar a otro.

La inclusión de objetivos humanos en el análisis de la salud oceánica constituye una diferencia radical con respecto a los enfoques tradicionales. No obstante, las políticas públicas y las organizaciones conservacionistas de todo el mundo ya están convergiendo hacia una visión de la población humana como parte fundamental de todos los ecosistemas de la Tierra. Cualquier estrategia de gestión debe aceptar esta realidad. Si nos centramos tan solo en excluir a la gente de la naturaleza, los planes conservacionistas están condenados al fracaso.

El índice constituye un primer paso muy importante. Los países no pueden mejorar la salud de sus mares sin conocer antes la situación en que se hallan. En ese sentido, el índice se convierte en una referencia clave. A finales del año pasado, el NCEAS y varios de sus colaboradores realizaron pruebas de su aplicación en EE.UU., Fiyi y Brasil. Los políticos y los gestores lo podrían utilizar para guiar la toma de decisiones, por ejemplo sobre la posible expansión de las centrales eólicas marinas en Estados Unidos, sobre si las medidas conservacionistas terrestres o marinas serán beneficiosas para los arrecifes coralinos de Fiyi y sobre el modo en que los planes de establecimiento de distintas zonas marítimas en Brasil podrían afectar a la salud oceánica general.

Por supuesto, las distintas personas y países adyacentes podrían asignar prioridades diferentes a cada objetivo. Como herramienta que los engloba a todos ellos, el índice puede resultar útil para cualquier negociación, al identificar los posibles compromisos y sinergias.

—Benjamin S. Halpern
Centro de Planificación y Evaluación de los Mares
Universidad de California
Santa Bárbara

FUENTE: CENTRO NACIONAL PARA EL ANÁLISIS Y SÍNTESIS ECOLÓGICOS; XNR PRODUCTIONS (*mapa*), JEN CHRISTIANSEN (*gráficos*)

El mundo en su conjunto está conservando la limpieza de las aguas y la biodiversidad, pero no gestiona con eficiencia las pesquerías y el turismo.

Productos naturales (arena, conchas) 40
Pesca local 87
Obtención sostenible de marisco 24
Biodiversidad 83
Limpieza del agua 78
Conservación del paisaje 55
Economía costera 75
Turismo y ocio 10
Protección costera 73
Potencial de almacenaje de carbono 75
Media mundial 60*

*Puntuación del índice

Si bien los primeros puestos corresponden a islas remotas, Alemania se halla en la quinta posición tras haber realizado un progreso notable hasta cumplir ocho de sus objetivos.

Alemania 73
80, 95, 26, 89, 70, 75, 90, 2, 99, 100

EE.UU., en el puesto 27, alcanza la mayoría de sus objetivos, pero se queda atrás en la obtención sostenible de marisco y productos naturales.

EE.UU. 63
35, 97, 25, 76, 74, 82, 97, 1, 79, 66

Los cinco últimos países se encuentran en África occidental. Permanecen hundidos en la pobreza, la inestabilidad política y un uso no sostenible de los recursos.

Sierra Leona 36
0, 70, 21, 61, 53, 37, 87, 0, 5, 23

FÍSICA NUCLEAR

El núcleo «doblemente mágico» de estaño 100

Un experimento confirma la validez del modelo de capas para describir la desintegración de núcleos exóticos inestables. El resultado ayudará a entender mejor las explosiones de supernova

A juzgar por las ilustraciones que aparecen en la mayoría de los libros de texto, podríamos pensar que el núcleo atómico constituye un cúmulo desorganizado de protones y neutrones. Sin embargo, goza de una estructura compleja y una rica fenomenología que los físicos llevan años intentando modelizar. En un trabajo reciente, realizado junto con otros colaboradores y publicado el pasado mes de junio en la revista *Nature*, logramos determinar las propiedades de desintegración de un núcleo que ocupa una posición muy especial en la tabla de núcleos: el isótopo «doblemente mágico» de estaño 100. Nuestros resultados apuntalan la validez de uno de los modelos más empleados para describir el núcleo atómico y podrían ayudarnos a entender mejor un fenómeno aparentemente muy alejado del diminuto mundo de la física nuclear: las explosiones de supernova.

La dificultad para describir la estructura nuclear obedece a dos razones principales. Por un lado, los nucleones experimentan tres de las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza: la interacción fuerte, la débil y la electromagnética. Este exótico escenario contrasta con nuestra experiencia cotidiana, gobernada en esencia por el electromagnetismo y la fuerza de la gravedad. Por otro, la escala del sistema implica que los nucleones presentan un comportamiento cuántico, por lo que sus posibles energías y estados no son continuos, como ocurre en el mundo macroscópico, sino discretos.

A lo largo de los años se han sugerido modelos muy diversos para dar cuenta de las complejas propiedades del núcleo atómico. Uno de ellos es el modelo de capas, propuesto hacia mediados del siglo pasado. Por aquel entonces se observó que los núcleos que poseían una cantidad determinada de protones, neutrones o ambos exhibían propiedades particularmente estables. Tales números (2, 8, 20, 28, 50, 82 y 126) recibieron el calificativo de «mágicos». Los núcleos correspondientes poseían una energía de enlace por nucleón elevada y presentaban una geometría esférica. Ese patrón llevó a la conclusión de que el núcleo atómico no constituía un aglomerado aleatorio de protones y neutrones, sino que debía presentar una disposición estructurada en capas, similar a la que muestran los electrones de la corteza atómica. Cada número mágico de nucleones completaría una capa, lo cual resultaría en una configuración particularmente estable.

Desintegraciones y estructura nuclear

Una técnica experimental para estudiar la estructura interna del núcleo consiste en generar isótopos inestables en un acelerador de partículas, implantarlos en un blanco, esperar a que se desintegren y medir las propiedades de los cuantos de radiación emitidos en el proceso. Una de las formas más frecuentes de radiactividad es la desintegración beta (β), mediada por la interacción débil. En ella, uno de los protones del núcleo se transforma en un neutrón (β^+) o viceversa (β^-). En el primer caso se emiten un positrón y un neutrino electrónico; en el segundo, las antipartículas correspondientes (un electrón y un antineutrino). Otro tipo de desintegración corresponde a la captura electrónica, la cual puede entenderse como el proceso inverso de la desintegración β^+. Tiene lugar cuando uno de los protones del núcleo captura un electrón de las capas atómicas más internas, tras lo cual se transforma en un neutrón y emite un neutrino.

Las desintegraciones β en las que las partículas emitidas poseen sus espines alineados en paralelo reciben el nombre de transiciones de Gamow-Teller (GT). Estas revisten un interés particular, ya que su intensidad (la probabilidad con la que ocurre la transición) codifica una gran cantidad de información sobre la estructura e interacciones del núcleo. Las transiciones de tipo GT suelen estar dominadas por un máximo ancho a altas energías (por encima de varios megaelectronvoltios), conocido como resonancia colectiva gigante de Gamow-Teller.

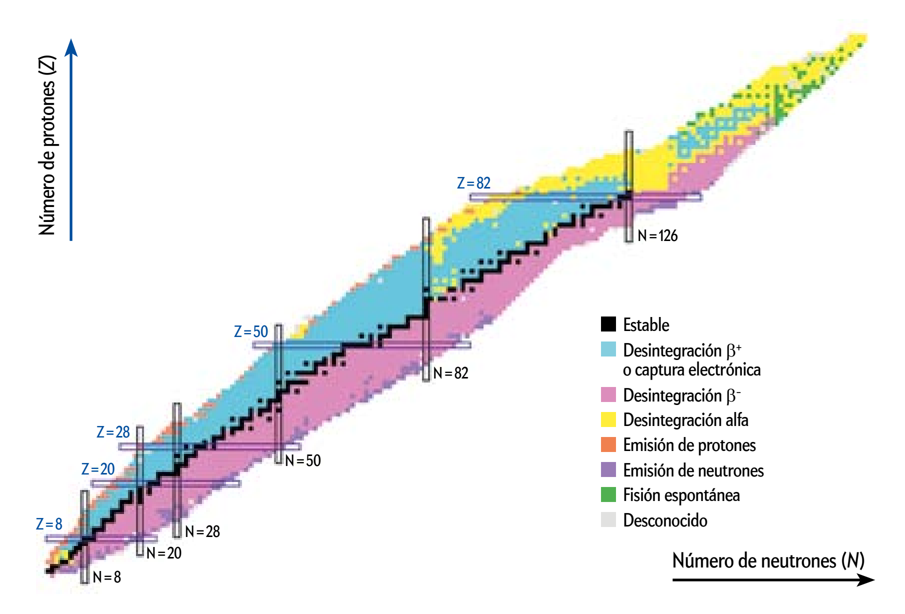


Tabla de núcleos: Modo de desintegración de cada núcleo en función de su número de protones (*Z*) y de neutrones (*N*). Las barras señalan aquellos núcleos que poseen un «número mágico» de nucleones, correspondientes a capas completas en la estructura nuclear. El núcleo de estaño 100 es el más pesado de los «doblemente mágicos» con igual número de protones (50) y de neutrones (50).

El núcleo de estaño 100 ocupa un lugar muy especial en la tabla de núcleos, ya que posee la cantidad «doblemente mágica» de 50 protones y 50 neutrones (el isótopo estable más ligero del estaño posee 50 protones y 62 neutrones). Según el modelo de capas, su desintegración β^+ debería estar dominada por una única transición de tipo GT hacia el primer estado cuántico excitado (1^+) del núcleo hijo, indio 100. Además, la ventana de energías disponibles en esta desintegración abarca la mayor parte de la resonancia gigante de GT. Por ello, el núcleo de estaño 100 y su desintegración constituyen un laboratorio excelente para comprobar la validez del modelo de capas, tanto en lo que se refiere a la estructura cuántica del núcleo como a su capacidad para predecir la intensidad de la transición de GT.

Los experimentos necesarios para producir los núcleos de estaño 100 y estudiar su desintegración fueron realizados en los laboratorios de la Sociedad para el Estudio de Iones Pesados (GSI) de Darmstadt, en Alemania. Por medio del acelerador lineal UNILAC acoplado al acelerador de sincrotrón SIS-18, generamos un haz de iones de xenón 124 con una energía cinética de 124 gigaelectronvoltios, una intensidad de $3 \cdot 10^9$ iones por pulso y una frecuencia de repetición de un pulso cada 3 segundos. Al colisionar contra un blanco de berilio, los núcleos de xenón se fragmentaron en una gran variedad de núcleos exóticos. Gracias a una combinación de campos magnéticos y degradadores energéticos, logramos seleccionar e identificar 259 núcleos de estaño 100, de los que 163 se implantaron en un detector semiconductor de silicio a fin de estudiar su desintegración.

En dicho dispositivo medimos las características de los positrones procedentes de la desintegración β^+ del estaño 100, así como el tiempo de vida media del núcleo. Además, con ayuda del de-

CENTRO NACIONAL DE DATOS NUCLEARES (NNDC) DE EE.UU.; LABORATORIO NACIONAL DE BROOKHAVEN; DEPARTAMENTO DE ENERGÍA DE EE.UU.

tector RISING, formado por 105 cristales semiconductores de germanio ultrapuro, detectamos los cuantos de radiación gamma emitidos por la desexcitación del núcleo hijo. Gracias a ello pudimos comprobar que el producto principal de la desintegración del estaño 100 era, en efecto, el estado cuántico 1^+ del núcleo de indio 100. La desintegración de GT registrada en el experimento es la de mayor intensidad observada hasta la fecha.

Nuestros resultados suponen una confirmación del modelo de capas, al tiempo que garantizan la fiabilidad de los cálculos a gran escala para núcleos próximos a los cierres de capas, pero muy exóticos. A su vez, ello nos permitirá determinar con mayor precisión la intensidad de las desintegraciones de GT en otros núcleos exóticos; en particular, en aquellos relevantes para el estudio de procesos astrofísicos.

Implicaciones astrofísicas

Las transiciones β de tipo GT desempeñan un papel clave en el mecanismo de implosión que antecede a la fase de explosión de una supernova. En el interior de las estrellas, debido a las extremas condiciones de presión y temperatura, se producen reacciones de fusión nuclear en las que se van sintetizando elementos cada vez más pesados. La energía liberada en tales procesos estabiliza la estrella frente a la contracción gravitatoria. Sin embargo, cuando en el interior del astro se ha acumulado una cantidad considerable de hierro y níquel, ya no resulta energéticamente favorable continuar sintetizando elementos más masivos. Ello deriva en la formación de un núcleo estelar inerte cuyo colapso gravitatorio solo se ve impedido por la presión que ejercen los electrones degenerados (una consecuencia del principio de exclusión de Pauli, que impide que dos electrones ocupen a la vez el mismo estado cuántico).

No obstante, cuando la masa del núcleo inerte se aproxima al límite de Chandrasekhar (unas 1,4 masas solares) comienzan a tener lugar los procesos de captura electrónica de tipo GT mencionados arriba, los cuales reducen la densidad electrónica en el medio estelar y propician así el colapso o implosión gravitatoria. En este sentido, la confirmación experimental de la validez del modelo de capas para describir transiciones de GT en núcleos inestables representa un avance notable que nos permitirá mejorar la fiabilidad de los cálculos astrofísicos de evolución estelar, así como profundizar en nuestra comprensión de las condiciones dinámicas que anteceden a la explosión de una supernova.

—César Domingo Pardo
Instituto de Física Corpuscular
CSIC, Universidad de Valencia

CONSERVACIÓN

Gestión de plantas invasoras en España

Un estudio recomienda dedicar más recursos y esfuerzos a la prevención y detección precoz de las invasiones, así como al seguimiento de las actuaciones realizadas

El impacto de las invasiones biológicas ha determinado que, en la actualidad, su gestión se haya convertido en una prioridad para la conservación de la biodiversidad y los espacios naturales. Las invasiones se producen como consecuencia de una serie de etapas que incluyen el transporte, la introducción, el establecimiento y la expansión de especies exóticas fuera de su área de distribución original. De todas las especies transportadas, solo una pequeña proporción, las que etiquetamos como «invasoras», logran superar las distintas etapas. Algunas de ellas ocasionan impactos ecológicos importantes sobre los organismos y los ecosistemas que invaden, y también conllevan repercusiones socioeconómicas.

Cabe destacar el jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), con una gran capacidad para colonizar grandes extensiones de agua en poco tiempo, lo que acarrea consecuencias negativas para la conservación de los ecosistemas acuáticos y en sectores como la pesca o la navegación. Otro ejemplo es la uña de gato (*Carpobrotus sp.*), que compite por el espacio, el agua y la luz con especies nativas, algunas de ellas endémicas de los ecosistemas costeros.

El hecho de que algunas plantas se conviertan en invasoras, y otras no, guarda relación con la biología de la especie y las características del ecosistema receptor, aunque parecen también determinantes otros factores asociados al proceso de introducción, como el número de introducciones de la especie en una nueva región o la cantidad de individuos introducidos.



IGNASI BARTOMEUS

La uña de gato (*Carpobrotus edulis*) es una especie sudafricana muy extendida por el litoral peninsular.

Decidir la estrategia

Existen diferentes tipos de actuaciones para hacer frente al problema de las especies invasoras: la prevención, la detección precoz y erradicación y, finalmente, el control poblacional. La elección de la estrategia dependerá en gran parte de la etapa en que se encuentre la invasión biológica. No obstante, la prevención representa la medida más recomendada por la Convención sobre la Diversidad Biológica y por los científicos y, también, la opción más económica, más efectiva y con menor coste ambiental. Consiste en identificar especies potencialmente invasoras a partir de métodos diversos, como los protocolos de análisis de riesgo. En ellos se evalúa la biología de la especie, las características climáticas de la región de origen y de la región receptora, el tipo de gestión necesario para su control y la historia de la invasión en otros lugares, tras lo cual se asigna un valor a la planta que representa una medida de su potencial invasor.

Una vez introducida una especie exótica, es importante detectarla con rapidez y tratar de erradicarla, lo cual solo resulta viable si las poblaciones poseen un tamaño reducido. Para lograr ese objetivo son fundamentales los planes de seguimiento y control de especies invasoras, dotados de mecanismos de detección precoz y medidas de actuación urgente, pero también la educación ambiental de los ciudadanos que pueden, por un lado, evitar su introducción y, por otro, ayudar a identificar posibles nuevas invasiones.



Tareas de eliminación de la uña de gato en las costas de Cádiz.

Cuando la especie se ha establecido en el medio natural y ha empezado a expandirse, la única estrategia eficaz consiste en su control poblacional mediante métodos manuales, mecánicos, químicos o biológicos adaptados a cada caso. Sin embargo, con frecuencia la gestión se centra en detener las especies muy extendidas por el territorio, lo que conlleva un alto coste y tiene una baja efectividad.

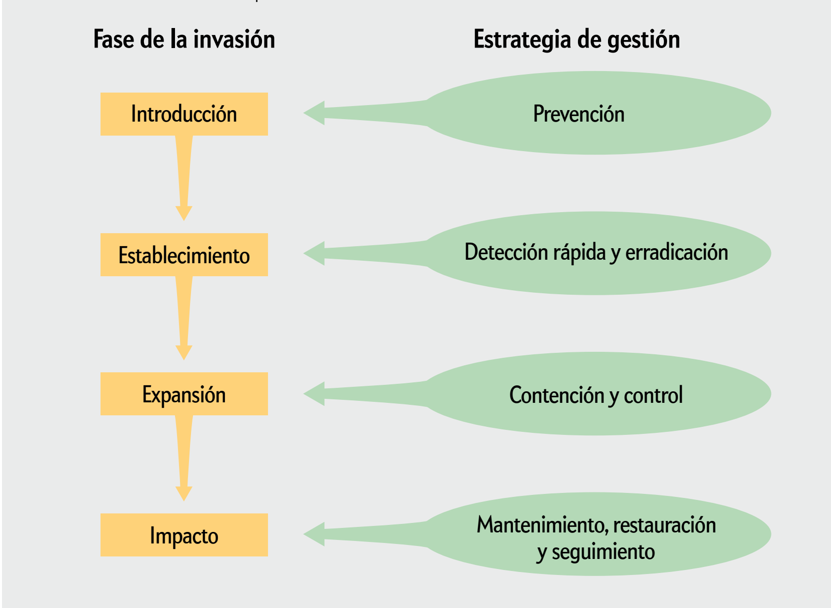
Por último, para asegurar el éxito de las actuaciones de control, cabe aplicar medidas de mantenimiento, restauración y seguimiento a largo plazo en los ecosistemas previamente invadidos. El mantenimiento evita la reaparición de la planta invasora y de otras especies exóticas que podrían aprovechar el vacío ecológico dejado por esta para instalarse. Por otro lado, las medidas de restauración pretenden restablecer la estructura de la comunidad nativa y el funcionamiento del ecosistema, lo que en muchos casos ayuda a prevenir nuevas invasiones. El seguimiento a largo plazo de las dos estrategias anteriores es extremadamente valioso para asegurar el éxito, ya que permite evitar invasiones secundarias, problemas de erosión y cambios en la estructura de los hábitats, entre otros aspectos. El seguimiento puede llevarse a cabo mediante la comparación entre zonas que sufren una invasión, zonas de referencia no invadidas y zonas donde se ha eliminado una especie exótica.

Medidas aplicadas en España

Un estudio sobre la gestión de las plantas exóticas en España llevado a cabo por

SOLUCIONES

La estrategia de gestión más eficaz para hacer frente a la proliferación de las plantas exóticas dependerá de la fase de invasión en que se hallen. Las medidas de prevención evitarán la introducción de la planta en el ecosistema; la detección y erradicación impedirán el establecimiento de la especie ya introducida; si la especie se ha establecido, se recomiendan estrategias de contención y control para eliminarla; por último, resulta importante realizar labores de mantenimiento en el ecosistema para evitar nuevas invasiones.



CONSEJERÍA DE MEDIO AMBIENTE, JUNTA DE ANDALUCÍA (*tareas de eliminación*); ADAPTADO DE «BEYOND CONTROL: WIDER IMPLICATIONS FOR THE MANAGEMENT OF BIOLOGICAL INVASIONS», DE PHILIP E. HULME, EN *JOURNAL OF APPLIED ECOLOGY*, VOL 43, PÁGS. 835-847, OCTUBRE DE 2006

nuestro grupo, publicado en *Environmental Management* en 2009, demostró que las invasiones biológicas empezaban a formar parte de la agenda ambiental y, según los gestores, representaban un problema de prioridad creciente. Un total de 109 especies han sido o están siendo tratadas en 14 comunidades autónomas. Hasta la fecha, la gestión se ha centrado en aplicar medidas locales de control mecánico o químico de la planta invasora. En cambio, apenas se han realizado medidas de prevención, detección precoz o respuesta rápida, a pesar de su importancia para evitar la entrada y establecimiento de especies potencialmente invasoras. La divulgación, sensibilización e información al público sobre la problemática de las especies invasoras reviste una enorme importancia, así como el desarrollo de protocolos de análisis de riesgo para identificar la fracción de especies introducidas con una alta probabilidad de convertirse en invasoras. Estos protocolos pueden servir para justificar la prohibición del uso de determinadas especies en jardinería o como especies forestales.

Nuestro estudio ha puesto también de manifiesto que las medidas de control o erradicación llevadas a cabo en España se basan en objetivos a corto plazo, con una falta importante de los trabajos de mantenimiento, restauración y seguimiento a medio y largo plazo que permitan evaluar el éxito de las actuaciones.

La mayoría de los técnicos y gestores de las diversas administraciones consultadas destacan que la gestión de las plantas invasoras se enfrenta a múltiples limitaciones, como la falta de financiación, la descoordinación entre administraciones y colectivos implicados, la escasa concienciación o el marco legal insuficiente, entre otras. En 2011 se publicó el Real Decreto 1628/2011 por el que se regula el Catálogo Español de Especies Exóticas Invasoras (Artículo 61 - Ley 42/2007 del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad). La inclusión de una especie en el Catálogo conlleva la prohibición genérica de su posesión, transporte, tráfico y comercio.

En el contexto actual de recursos económicos escasos es importante elaborar una estrategia general que identifique las prioridades. Entre estas deberían figurar de modo preeminente las estrategias de prevención, detección precoz y control rápido —mucho más económicas y efectivas que las de control en fases más avanzadas de la invasión—, así como de seguimiento de las actuaciones realizadas.

—Jara Andreu
Centro de Investigación Ecológica y Aplicaciones Forestales (CREAF)
—Montserrat Vilà
Estación Biológica de Doñana (EBD-CSIC)
—Joan Pino
CREAF y Universidad Autónoma de Barcelona

TERMODINÁMICA

Motores microscópicos

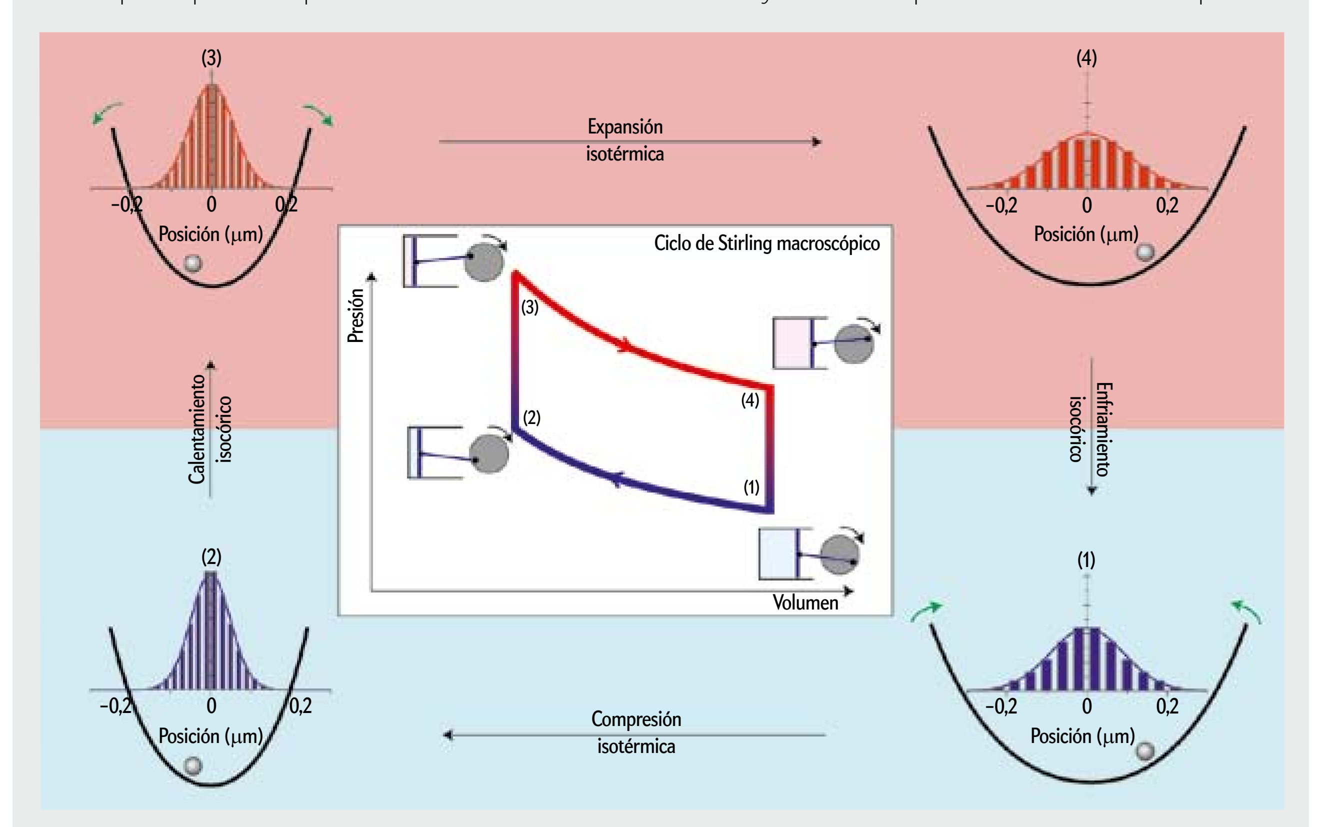
Un motor de Stirling que opera con un «fluido» de una sola partícula permite investigar a escala microscópica la conversión de energía térmica en mecánica

Tal y como nos enseñan los libros de texto, un motor térmico convierte el calor en trabajo. Por lo general, ello se consigue gracias a la compresión y expansión de un gas macroscópico, en cuyo caso el volumen, la presión y la temperatura del fluido poseen una definición precisa. Pero ¿qué ocurre cuando reducimos el tamaño del dispositivo hasta tal punto que algunas de esas variables termodinámicas dejan de estar bien definidas o, en el mejor de los casos, fluctúan? La respuesta bien podría hallarse al alcance de la mano. En un artículo publicado en febrero de 2012 en la revista *Nature Physics*, Valentin Blickle y Clemens Bechinger, de la Universidad de Stuttgart, referían la construcción de un motor de Stirling de escala microscópica.

El ciclo de Stirling clásico comienza con la compresión isotérmica de un gas a baja temperatura, a la que siguen un calentamiento a volumen constante (isocórico), una expansión isotérmica y un enfriamiento isocórico, el cual devuelve el gas a sus condiciones iniciales. En la versión microscópica de Blickle y Bechinger, el papel del gas lo desempeña una sola

CICLOS DE STIRLING

El ciclo macroscópico de Stirling (*inserto*) consta de la compresión isotérmica de un gas a baja temperatura (*1 → 2, azul*), un calentamiento isocórico (a volumen constante, *2 → 3*), una expansión isoterma (*3 → 4, rojo*) y un enfriamiento isocórico (*4 → 1*). En su versión microscópica, el fluido ha sido reemplazado por una sola partícula coloidal sometida a movimiento browniano y confinada en el potencial cuadrático de una trampa láser.



Los histogramas muestran la distribución de probabilidad de la posición de la partícula. La intensidad de la trampa podía ajustarse a voluntad a fin de imitar las fases de compresión y expansión del ciclo ordinario, mientras que la temperatura del agua se regulaba entre 22 y 86 grados centígrados con ayuda de un segundo láser. A pesar de que algunas de las variables termodinámicas usuales, como la presión, adquieren aquí un carácter estocástico, los investigadores comprobaron que, al promediar sobre un número elevado de ciclos, la partícula realizaba trabajo. En el límite de ciclos muy lentos, su rendimiento se aproximaba al valor clásico.

DE: «REALIZATION OF A MICROMETRE-SIZED STOCHASTIC HEAT ENGINE». V. BLICKLE Y C. BECHINGER EN *NATURE PHYSICS* N.º 8, PÁGS. 143-146, FEBRERO DE 2012

partícula suspendida en agua y sometida a movimiento browniano, una posibilidad que ya había sido sugerida con anterioridad para el ciclo de Carnot. La partícula se encuentra confinada en una trampa óptica de intensidad variable, lo cual permite ajustar a voluntad el volumen de la región en la que se halla confinada la partícula y, de esa manera, emular las fases de compresión y expansión del ciclo ordinario. Por último, el agua que rodea la partícula es calentada con un láser cuya longitud de onda coincide con uno de los picos de absorción del agua. Ello permite inducir cambios muy rápidos y precisos en la temperatura del agua (de 22 a 90 grados Celsius en 10 milisegundos) y completar así todas las fases del ciclo de Stirling.

En su experimento, los investigadores lograron medir la cantidad de trabajo realizada en cada paso con una precisión del orden de 10-22 julios, inferior a la energía térmica (kBT ≈ 10-21, donde kB denota la constante de Boltzmann y T indica la temperatura absoluta del agua que rodea a la partícula, entre 295 y 363 grados Kelvin). Con semejante grado de precisión y control, el prototipo de Blickle y Bechinger ha abierto la puerta al estudio y diseño de un nuevo tipo de máquinas microscópicas.

Trinquetes y demonios

A escalas tan diminutas, las fluctuaciones térmicas resultan ineludibles, por lo que tanto el trabajo realizado como el calor disipado se convierten en cantidades aleatorias. El marco teórico adecuado para analizar tales fluctuaciones recibe el nombre de termodinámica estocástica, una disciplina desarrollada durante la última década dentro del contexto de la mecánica estadística de no equilibrio. Este potente formalismo no solo permite calcular el calor y el trabajo a lo largo una trayectoria microscópica, sino que explica también algunas de las sorprendentes propiedades de sus fluctuaciones (como la igualdad de Jarzynski o el teorema de Crooks, ambos válidos incluso en situaciones muy alejadas del equilibrio). Sus aplicaciones incluyen el análisis de un buen número de experimentos con partículas brownianas o macromoléculas, así como la investigación sobre proteínas motoras en el interior celular. No obstante, el experimento de Blickle y Bechinger fue el primero en incorporar la característica distintiva de un motor térmico: baños térmicos a temperaturas distintas.

Tal y como ocurre con un motor térmico ordinario, el micromotor de Blickle y Bechinger extrae calor del baño caliente, convierte una parte en trabajo mecánico y disipa el resto hacia el baño frío. A primera vista, sin embargo, no resulta obvio que la partícula realice trabajo alguno. Cuando un gas macroscópico se expande y empuja un pistón, la fuerza ejercida puede aprovecharse para hacer girar

una rueda o levantar un peso. En el caso microscópico, la partícula cede energía cuando la trampa óptica se relaja, pero esta no puede aprovecharse para mover un objeto (o, para ser más precisos, aún ignoramos cómo hacerlo). Sin embargo, puesto que la energía pasa de la partícula al dispositivo que conforma la trampa óptica, puede ser considerada como trabajo y distinguirse de la energía disipada al agua circundante (el baño térmico), la cual constituye calor.

Las fluctuaciones aleatorias provocan que la partícula describa una trayectoria diferente cada vez que se repite el ciclo. A lo largo de cada una de ellas, pueden medirse el trabajo y los cambios en la energía cinética de la partícula y, a partir de esos datos, calcular la cantidad de calor cedida al baño térmico. Pero el trabajo y el calor no solo fluctúan, sino que lo hacen en torno a un valor medio que resulta ser del mismo orden que dichas fluctuaciones ($k_B T$). A pesar de ello, Blickle y Bechinger demostraron que, tras un gran número de ciclos, podía extraerse trabajo de un modo sistemático. Además, en el caso de un proceso muy lento, el rendimiento medio del dispositivo se aproximaba al valor predicho por la termodinámica clásica y determinista para el ciclo de Stirling.

Los mecanismos físicos de un motor difieren ligeramente si se trata de uno macroscópico o microscópico. En el primer caso, la expansión se realiza siempre a mayor temperatura; dado que ello implica una mayor presión, el trabajo neto efectuado en cada ciclo es positivo. En cambio, en el caso de una sola partícula la presión no se encuentra bien definida. En su lugar, el micromotor realiza trabajo gracias a que las fluctuaciones del movimiento browniano aumentan cuando la temperatura es elevada. Desde este punto de vista, el dispositivo de Blickle y Bechinger resulta análogo al famoso trinquete de Feynman, que extrae energía a partir de las fluctuaciones térmicas cuando opera entre un baño frío y otro caliente.

El experimento ilustra de manera sorprendente el funcionamiento de la termodinámica estocástica en presencia de baños térmicos a diferentes temperaturas. Sin embargo, aún ignoramos cómo incorporar varios baños térmicos o un gradiente de temperatura en dispositivos nanoscópicos de interés práctico. Tampoco existen pruebas de que las máquinas moleculares biológicas empleen tales gradientes. Al fin y al cabo, los motores moleculares que hallamos en la naturaleza suelen operar en entornos isotérmicos, si bien es cierto que tal vez existan gradientes térmicos en el interior de la célula. En lo que respecta a los dispositivos artificiales a escala nanométrica, implementar gradientes térmicos se antoja complicado. Con todo, podrían ser relevantes en los procesos de conversión de energía térmica; de hecho, se ha observado que pueden inducir fuerzas mecánicas en nanotubos de carbono.

Una de las preguntas más interesantes que plantea el trabajo de Blickle y Bechinger reside en la posibilidad de utilizar las fluctuaciones —una consecuencia ineludible de trabajar a escala microscópica— para mejorar el rendimiento del motor a través de algún tipo de retroalimentación; es decir, modificando el ciclo en función de la posición de la partícula. Procesos de esa clase, que recuerdan al conocido demonio de Maxwell, ya se han conseguido en condiciones isotérmicas. El montaje experimental de Blickle y Bechinger admite, en principio, ese tipo de control. En caso de lograrse, ello daría lugar a fenómenos de gran interés y plantearía nuevos retos teóricos.

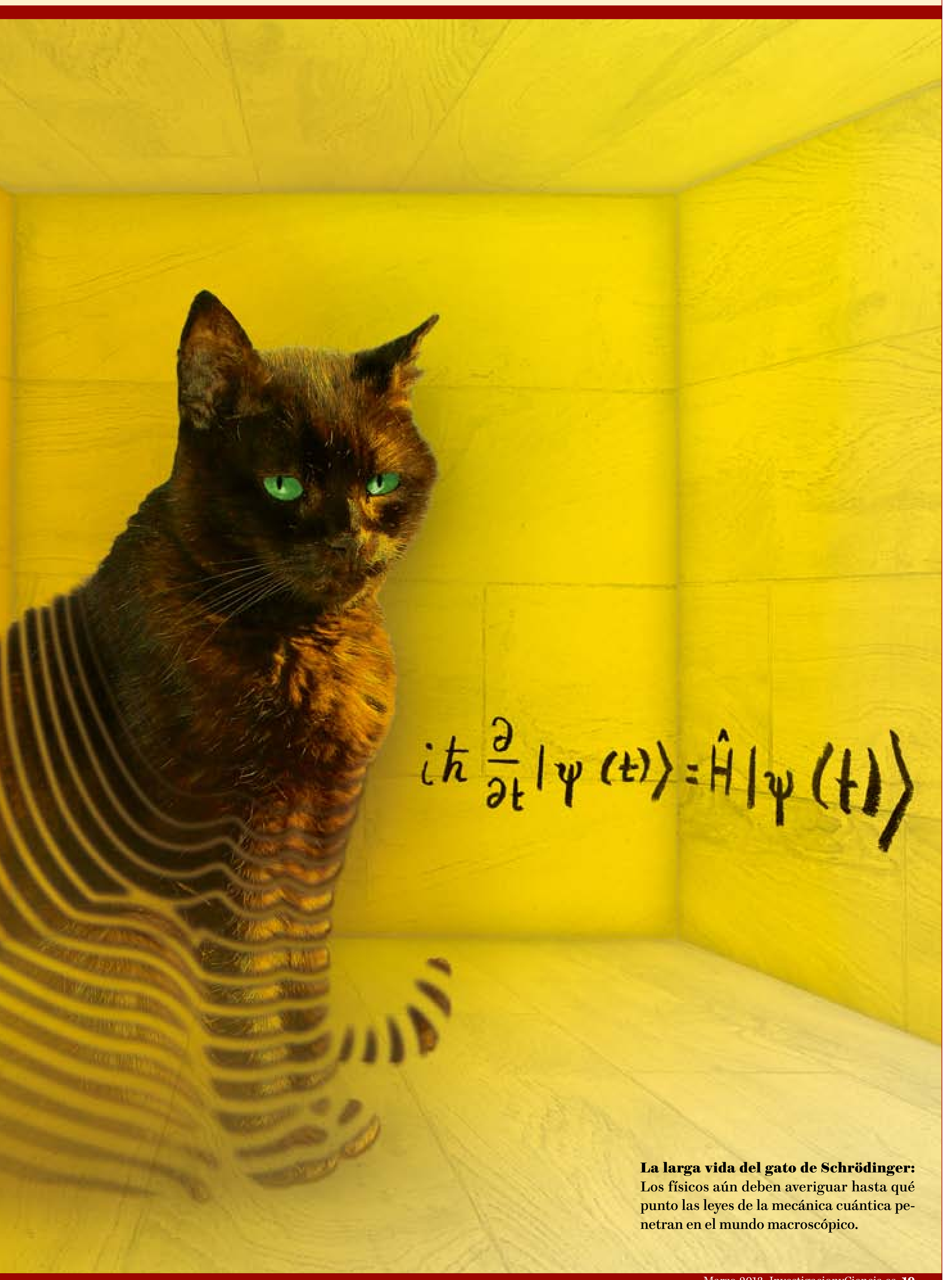
—Jordan M. Horowitz
y Juan M. R. Parrondo
Grupo Interdisciplinar de Sistemas Complejos (GISC)
Departamento de física atómica, molecular y nuclear
Universidad Complutense de Madrid

Artículo original publicado en *Nature Physics* vol. 8, págs. 108-109, 2012.
Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd.

EFECTOS CUÁNTICOS MACROSCÓPICOS

¿Puede observarse la superposición de estados en sistemas físicos de gran masa y tamaño? Un nuevo campo de investigación podría ayudar a resolver una cuestión sobre la que ya debatieron Einstein y Schrödinger

Markus Aspelmeyer y Markus Arndt



La larga vida del gato de Schrödinger: Los físicos aún deben averiguar hasta qué punto las leyes de la mecánica cuántica penetran en el mundo macroscópico.

Markus Aspelmeyer y **Markus Arndt** son profesores de información cuántica y nanofísica en la Universidad de Viena e investigadores en el Centro Vienés de Ciencia y Tecnología Cuánticas.



«Querido Schrödinger, eres la única persona con la que realmente me agrada discutir.» En abril de 1935, Albert Einstein dirigía desde California estas palabras a su amigo Erwin Schrödinger, quien por aquel entonces trabajaba en el Colegio Magdalen de la Universidad de Oxford. Con esta carta, los físicos comenzaron una discusión sobre uno de los aspectos básicos de la interpretación de la mecánica cuántica: ¿qué nos dice la función de onda sobre el mundo físico?

En 1926, el físico vienés había introducido la función de onda como uno de los objetos matemáticos fundamentales de la teoría cuántica. Junto con la expresión que hoy conocemos como ecuación de Schrödinger, la función de onda permite calcular la probabilidad futura de obtener un resultado u otro al efectuar una medición sobre un sistema físico. Pero ¿describe dicha función algo que realmente existe? ¿O se trata más bien de un recurso matemático —un «catálogo de valores esperados», en palabras de Schrödinger— sin conexión directa con la realidad? La discusión llevó al austríaco a concebir el famoso experimento mental en el que un gato sometido a una trampa cuántica se hallaría vivo y muerto al mismo tiempo. El ejemplo propuesto por Schrödinger hace transparente la pregunta de hasta qué punto las leyes de la mecánica cuántica se aplican a los objetos macroscópicos de nuestra experiencia cotidiana.

Un sencillo experimento nos servirá para ilustrar el problema. Un haz de moléculas, cada una de ellas compuesta por varias docenas de átomos, se dirige hacia una red de difracción. En ella hay grabadas rendijas de 50 nanómetros de ancho, separadas por una distancia de unos 100 nanómetros. Tras la red disponemos una pantalla detectora. Si determinamos con precisión el lugar de origen de las partículas en la fuente emisora, su momento en la dirección lateral se verá afectado por una gran dispersión de valores, tal y como prescribe la relación de incertidumbre de Heisenberg. Según esta, posición y momento lineal no se pueden especificar al mismo tiempo con una precisión arbitraria, ya que el producto de sus respectivas indeterminaciones debe superar siempre cierto valor límite, del orden de la constante de Planck.

Gracias a esa dispersión, cada molécula podrá tomar varios caminos a través de las diferentes ranuras para llegar a la placa detectora, lo cual se plasmará en una superposición de posibilidades fundamentalmente indistinguibles. Si las moléculas se comportasen como bolas de billar que obedecen las leyes de

EN SÍNTESIS

El «gato de Schrödinger», una aparente paradoja concebida en los años treinta, ha ocupado durante decenios a físicos y filósofos con la siguiente pregunta: ¿puede un objeto macroscópico no observado hallarse en una superposición cuántica de estados? ¿Puede un gato estar vivo y muerto al mismo tiempo?

Bajo esta pregunta subyace el problema de la medida. Al efectuar una medición sobre un sistema cuántico descrito por una superposición de estados, la función de onda «colapsa» hacia un único resultado de entre todos los posibles. ¿Qué principios rigen esa interacción entre lo cuántico y lo macroscópico?

Durante los últimos años se han logrado avances notables en la carrera experimental para observar efectos cuánticos en sistemas físicos de grandes dimensiones. Las respuestas que nos depare este campo de investigación afectarán de manera fundamental a nuestra concepción de la realidad física.

DANIELA LEITNER/SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT (*páginas anteriores*)

Newton, observaríamos que las manchas que dejan al llegar a la pantalla imitan la distribución de rendijas en la red. Sin embargo, el experimento da como resultado un patrón de interferencia: una serie de líneas claras y oscuras cuya envolvente resulta demasiado ancha para haber sido originada por un objeto clásico.

La anchura del conjunto de líneas se debe de nuevo al principio de incertidumbre: cada rendija limita localmente los caminos posibles, lo que causa una dispersión del momento en la dirección transversal. Por otro lado, existen posiciones en la pantalla de detección a las que una molécula podría haber llegado en caso de haber una sola rendija; sin embargo, cuando el experimento se realiza con más de una ranura, en dichas regiones no se detecta partícula alguna.

La primera demostración experimental de un fenómeno de interferencia cuántica con moléculas complejas fue efectuada en 1999 por Anton Zeilinger y otros investigadores de la Universidad de Viena; entre ellos, uno de los autores (Arndt). El año pasado, Thomas Juffmann y otros miembros del grupo de investigación de Arndt llevaron el experimento aún más lejos: filmaron la dualidad onda-corpúsculo con una cámara de dispositivo de carga acoplada (CCD), gracias a lo cual lograron seguir en tiempo real la formación del patrón de interferencia con moléculas de colorante lanzadas de una en una. La grabación ponía de relieve los dos aspectos del mundo cuántico: por una parte, la naturaleza corpuscular de las moléculas, pues cada una de ellas podía localizarse con precisión a su llegada a la pantalla detectora; por otra, su carácter ondulatorio, necesario para explicar que todas las partículas se «coordinasen» para acabar dibujando sobre la placa un patrón de interferencia.

Para realizar el experimento, Juffmann y sus colaboradores necesitaron emplear nanoestructuras muy finas, de apenas cien átomos de espesor, a fin de reducir al máximo las interacciones de Van der Waals entre las partículas y las paredes de la red de difracción. Dichas estructuras fueron fabricadas por Aleksander Tsukernik y Ori Cheshnovsky, de la Universidad de Tel Aviv. Ello permitió al grupo vienés investigar las propiedades cuánticas de moléculas formadas por más de cien átomos, que Jens Tüxen y Marcel Mayor, de la Universidad de Basilea, diseñaron y sintetizaron para la ocasión.

El resultado contradice la suposición clásica según la cual una molécula solo puede pasar por una rendija pero no por varias a la vez. La teoría cuántica, en cambio, predice de manera correcta el patrón de interferencia observado en los experimentos. Según la mecánica cuántica, también la materia queda descrita por una función de onda y, como tal, le es permitido tomar varios caminos de manera simultánea. Esa deslocalización puede alcanzar dimensiones macroscópicas: en el experimento descrito, la dispersión al final del tramo ascendía a décimas de milímetro.

Al menos en principio, las leyes de la mecánica cuántica deberían poder aplicarse a objetos tan grandes como deseemos. Ello implicaría que también los cuerpos macroscópicos deberían experimentar la superposición de estados, lo que sin duda choca de forma drástica con nuestra visión del mundo. A ese aspecto hacía referencia el experimento mental de Schrödinger.

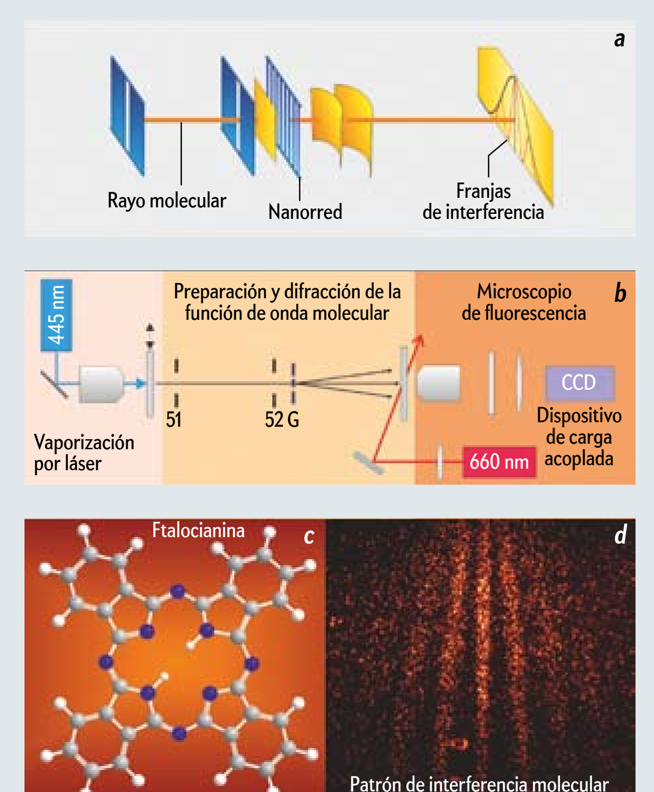
DESLOCALIZACIÓN MACROSCÓPICA

Interferencia con moléculas de masa elevada

El experimento de difracción de luz por una red constituye una práctica estándar en las clases de física avanzada para mostrar la diferencia entre la óptica geométrica y la óptica física en las ondas electromagnéticas. Sin embargo, la misma idea se puede aplicar a ondas de materia.

La difracción de moléculas de masa elevada en una nanorred (*a*) constituye un ejemplo excelente de la naturaleza deslocalizada de los estados cuánticos. En un experimento (*b*) realizado el año pasado por el grupo de uno de los autores, ciertas moléculas de colorante (ftalocianinas, *c*) se vaporizaron por acción de un láser focalizado. El tamaño efectivo de la fuente (el láser más el colimador) resultaba tan pequeño que la relación de incertidumbre entre la posición y el momento lineal acabó dispersando cada molécula con respecto a la distribución de rendijas, separadas entre sí por una distancia de unos 100 nanómetros. Así, cada molécula podía tomar varios caminos posibles para atravesar la red y llegar hasta la pantalla detectora. En ella, la microscopía de fluorescencia inducida por láser reveló que las partículas llegaban a una, con una resolución espacial de unos 10 nanómetros.

La mecánica cuántica prescribe la imposibilidad de predecir con certeza el punto de incidencia de cada molécula, pues este solo obedece leyes probabilísticas. En nuestro caso, las funciones de onda se encontraban deslocalizadas sobre una distancia de más de cien micrómetros. Sin embargo, el conjunto de todas las moléculas acabó formando un patrón de franjas de interferencia (*d*), cuyo aspecto global sí estaba estrictamente predeterminado por la distribución cuántica de probabilidades.



CORTESÍA DE LOS AUTORES

El físico concibió una «máquina infernal» para transferir la superposición de estados de una partícula cuántica a una mezcla de los estados «vivo» y «muerto» de un gato, lo cual contradecía la suposición de que, en cada instante, el animal se encontraba o bien vivo, o bien muerto.

Para Einstein, ello suponía una clara prueba de que la mecánica cuántica proporcionaba una descripción incorrecta de la realidad. En su carta de 1935 escribió: «Ningún arte interpretativa puede convertir esta función-psi [la función de onda] en una descripción adecuada de un hecho real». Sin duda, nuestra intuición macroscópica clama contra la existencia de un estado intermedio entre la vida y la muerte, así como contra la posibilidad de que un objeto pueda hallarse en dos lugares al mismo tiempo.

¿DÓNDE ESTÁ EL LÍMITE?

¿Significa lo anterior que los objetos macroscópicos no obedecen las leyes de la mecánica cuántica, sino solo la mecánica de Newton y la electrodinámica de Maxwell? En tal caso, ¿dónde está el límite? ¿A qué masa, tamaño, número cuántico o complejidad estructural se convierte una teoría en otra? ¿Desempeña la fuerza de la gravedad —cuya unificación con la mecánica cuántica ha causado tantos quebraderos de cabeza a los físicos teóricos— algún papel en todo esto?

Esa manera de solucionar la paradoja del gato de Schrödinger implicaría la necesidad de modificar la teoría cuántica al alcanzar, como mínimo, cierto nivel macroscópico. Numerosos físicos contemplan dicha posibilidad con escepticismo: no en vano, las leyes de la mecánica cuántica (sobre todo en su forma relativista, la electrodinámica cuántica) han sido verificadas con precisión en todo tipo de experimentos. Por otro lado, si la teoría cuántica conservase su validez incluso a escala macroscópica, deberíamos alterar de manera radical nuestra visión del mundo en varios aspectos; entre ellos, nuestra comprensión del espacio y el tiempo, o nuestro concepto de realidad aplicado a objetos macroscópicos.

Todo lo anterior se resume en la pregunta clave: ¿desaparece de manera objetiva la superposición cuántica a partir de cierto límite, o vivimos en un mundo fundamentalmente cuántico? Tal vez el hecho de no observar fenómenos cuánticos en objetos de gran tamaño se deba a que estos no resultan medibles cuando interaccionan mas de 100 partículas... o más de 100 billones. Hoy por hoy, estas preguntas continúan abiertas. Nadie cuenta con una respuesta que no plantee nuevos problemas. Con todo, los físicos hemos intentado abordar la cuestión con experimentos cuánticos que afectan a objetos cada vez mayores. En este contexto, la masa y la posición desempeñan un papel esencial.

Una razón obvia por la que resulta tan difícil observar efectos cuánticos a escala macroscópica radica en que estos casi siempre dependen de manera explícita del cuanto de acción de Planck, h (expresado con frecuencia en forma de «constante de Planck reducida», $\hbar = h/2\pi$). Este posee unidades de energía × tiempo («acción») o, de manera equivalente, de momento angular, o momento lineal × longitud. Con un valor de $\hbar \approx 1{,}05 \cdot 10^{-34}$ julios × segundo, $\hbar$, la constante de Planck resulta 33 órdenes de magnitud menor que el momento angular del péndulo de un reloj de mesa. Por tanto, no sorprende que los efectos cuánticos resulten inobservables en un objeto macroscópico. Una bola de billar de 170 gramos que se desplaza a una velocidad de 2 metros por segundo, por ejemplo, lleva asociada una onda cuántica cuya longitud de onda asciende a unos $2 \cdot 10^{-33}$ metros. Sondear de manera directa distancias semejantes supera con mucho las posibilidades técnicas actuales.

> Se han observado efectos de interferencia cuántica en moléculas complejas de más de 400 átomos

Pero incluso si se otorga a la física cuántica una validez universal, la interacción entre las partes individuales de un sistema complejo puede hacer que las propiedades cuánticas se tornen inapreciables en cualquiera de sus componentes. Así lo establece la teoría de la decoherencia, desarrollada hace algunos años por Anthony Leggett, de la Universidad de Illinois, Hans-Dieter Zeh y Erich Joos, de la Universidad de Heidelberg, y Wojciech Zurek, del Laboratorio Nacional de Los Álamos, en-

OTROS EXPERIMENTOS

Superconductores y condensados de Bose-Einstein

Además de los casos descritos en este artículo, los estados de superposición macroscópicos cumplen también una función relevante en experimentos de otro tipo. Enumeramos a continuación algunos ejemplos.

- **La superposición de corrientes superconductoras** que, en los dispositivos superconductores de interferencia cuántica (SQUID), pueden circular tanto en el sentido de las agujas del reloj como en el contrario.
- **La superposición de billones de espines entre dos nubes de átomos**, como los producidos por el grupo de Eugene Polzik, del Instituto Niels Bohr de Copenhague.
- **La interferencia entre ondas de materia de millones de átomos en un condensado de Bose-Einstein**. A temperaturas ultrafrías (algunos nanokelvin), los átomos pueden deslocalizarse sobre distancias de milímetros y durante varios centenares de milisegundos. Siempre que los átomos no se encuentren mutuamente entrelazados, la masa y la longitud de onda de De Broglie asociadas a las funciones de onda que pueden interferir coinciden con las de un átomo individual (del mismo modo que un láser mantiene su color a medida que se aumenta su intensidad). Varios grupos de investigadores están trabajando en el entrelazamiento de átomos ultrafríos para mejorar la precisión de las mediciones.

Por otro lado, el entrelazamiento cuántico entre iones y átomos puede también extenderse sobre distancias macroscópicas. Con fotones, el entrelazamiento ha conseguido preservarse a lo largo de una distancia de más de 140 kilómetros.

tre otros. Su idea principal reside en que, si un sistema cuántico simple se acopla a otro mayor formado por un gran número de partículas (un baño térmico), parte de la información sobre el estado del primero se filtrará al segundo. Ello se debe a que el sistema cuántico original pasará a quedar entrelazado con los elementos que componen el baño térmico.

El término «entrelazamiento» fue acuñado en 1935 por Erwin Schrödinger para denotar ciertas superposiciones de estados en un sistema cuántico compuesto, en el que la función de onda del conjunto no permite describir por separado cada una de las partes constituyentes. Para Schrödinger, esta particularidad constituía «el rasgo característico de la mecánica cuántica». En el caso de un sistema entrelazado con su entorno, ello implica que los efectos cuánticos se tornan más sutiles o incluso desaparecen por completo.

En 1996, un equipo de investigadores de la Escuela Normal Superior de París dirigido por Serge Haroche, premio nóbel de física en 2012, llevó a cabo una serie de experimentos en los que lograron estudiar de manera cuantitativa el proceso de decoherencia. A partir de átomos de rubidio y una cavidad de paredes reflectantes, los investigadores lograron recrear una «versión lumínica» del gato de Schrödinger, compuesta en su caso por un pequeño número de fotones. Haroche y sus colaboradores observaron cómo en ellos aparecía una superposición de estados durante pocos microsegundos y, después, dicha superposición se desvanecía.

La decoherencia controlada de objetos materiales por dispersión de luz ha sido demostrada en experimentos de interferometría por investigadores del Instituto de Tecnología de Massachusetts y de la Universidad de Constanza. En 2004, un equipo de la Universidad de Viena comprobó que ciertas moléculas de gran tamaño podían acabar entrelazándose con el entorno por sí mismas debido a efectos térmicos, sin necesidad de una perturbación externa. Por esta razón, aislar a la perfección un sistema de su entorno constituye uno de los grandes retos a los que se enfrentan los experimentos cuánticos macroscópicos.

¿Por qué en una medición solo se obtiene un resultado concreto de entre todo el abanico de opciones posibles?

La gran ventaja de la decoherencia reside en que permite entender, dentro del marco de las leyes conocidas de la mecánica cuántica, por qué los fenómenos cuánticos son de alcance limitado (lo cual, de hecho, supone un problema en numerosas tecnologías incipientes, como la computación cuántica, en las que se busca preservar los efectos cuánticos lo máximo posible). Sin embargo, la decoherencia continúa planteando un desafío para nuestro concepto de realidad, puesto que no hace del mundo un lugar «real» en sentido estricto. Tampoco explica el «colapso» de la función de onda; es decir, por qué en una medición se obtiene solo un resultado concreto de entre todo el abanico de opciones posibles. De hecho, dado que la teoría de la decoherencia se basa en el entrelazamiento, tras realizar un experimento todo el sistema queda en un estado de superposición. No existe ningún proceso de medición definitivo que acabe con las superposiciones cuánticas y las reduzca a un único resultado. Antes bien, estas se transfieren a sistemas cada vez más complejos.

El problema del colapso de la función de onda ha llevado a algunos físicos a postular la existencia de universos paralelos. En 1954, durante la realización de su tesis doctoral en la Universidad de Princeton, Hugh Everett sugirió una interpretación de la mecánica cuántica que solucionaría el problema de la medida. A fin de que la teoría conservase su validez universal pero, al mismo tiempo, evitase la superposición de estados macroscópicamente distinguibles, Everett postuló que la mecánica cuántica no seleccionaba ningún estado concreto durante el proceso de medición. En su lugar, al realizar una medida tendrían lugar todas las opciones posibles, pero cada una en un universo diferente. Si bien esta hipótesis guarda una lógica interna, adolece de la clara desventaja de necesitar un gran número de universos. Además, se trata por su propia naturaleza de una teoría no falsable, por lo que su valor para el debate científico solo puede ser limitado [*véase* «Los muchos mundos de Hugh Everett», por P. Byrne; Investigación y Ciencia, febrero de 2008].

MODELOS DE COLAPSO

Los físicos reacios a aceptar la superposición de estados se preguntan sobre la posibilidad de modificar las ecuaciones básicas de la mecánica cuántica para que, al llegar a niveles macroscópicos, emerja a partir de ellas un comportamiento clásico. Tales cambios deberían ser lo suficientemente pequeños para explicar que hasta ahora no se hayan observado en los experimentos, pero también lo bastante grandes como para que, a escala macroscópica, solo resulten válidas las leyes de la física clásica.

Algunas de las primeras ideas para erigir una teoría cuántica sobre cimientos clásicos se deben a Louis de Broglie, el padre de la idea de asociar una onda a las partículas de materia. La mecánica cuántica es lineal, lo que en este contexto quiere decir que la suma de dos funciones de onda válidas da lugar a una nueva función de onda que satisface las mismas ecuaciones. El físico francés aspiraba a derivar la teoría cuántica a partir de una mecánica de ondas no lineal basada en conceptos clásicos.

En 1976, Iwo Bialynicki-Birula y Jerzy Mycielski formularon una ampliación no lineal de la ecuación de Schrödinger. Según esta, la función de onda de una partícula de gran masa no cambiaría con el tiempo e imitaría el comportamiento de una bola de billar; en el caso de masas pequeñas, las leyes habituales de la mecánica cuántica seguirían resultando válidas. Dicha ampliación no lineal fue descartada en 1981 por Roland Gähler, Anthony G. Klein y Anton Zeilinger mediante un experimento ultrapreciso de difracción de neutrones. La corrección no lineal propuesta debería haber modificado los órdenes de difracción más altos, lo cual no se observó.

En 1986, Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini y Tullio Weber sugirieron ampliar la teoría cuántica mediante la adición de un término estocástico no lineal en la ecuación de Schrödinger. Este modifica la evolución del paquete de ondas y provoca que un estado que describe una superposición de posiciones acabe concentrándose de manera espontánea en una región espacial bien definida (aunque no puntiforme). En este sentido, la función de onda colapsa de manera objetiva. Dicho colapso tendría lugar a tal velocidad que habría escapado a los experimentos más precisos de las últimas décadas. A la luz de los nuevos enfoques teóricos, las predicciones basadas en este modelo han llegado tan lejos que su validez podría compro-

barse si se lograra observar la superposición cuántica de objetos con masas comprendidas entre 10^5 y 10^9 unidades de masa atómica.

Otros modelos de colapso hacen referencia explícita al papel de la gravedad. ¿Cómo afecta al espaciotiempo la relación de indeterminación de Heisenberg aplicada a una partícula muy pesada? ¿Qué ocurre con el campo gravitatorio de una partícula lo bastante masiva cuando esta se encuentra en una superposición de estados asociados a posiciones diferentes? Expertos como Frigyes Károlyházy, Lajos Diósi o Roger Penrose han explorado de manera independiente las posibles respuestas a esta pregunta.

De manera semejante a como sucedía con los modelos descritos arriba, aquí también interviene una decoherencia reforzada de las superposiciones cuánticas. Su intensidad aumenta con la masa y tamaño de las partículas implicadas, o con el de sus funciones de onda. En cualquier caso, tales modificaciones no corresponden a una teoría de la gravedad cuántica, el santo grial de la física teórica. Más bien al contrario: la causa principal de que en estos modelos la superposición cuántica desaparezca se debe a que el campo gravitatorio no se cuantiza. Con experimentos que pongan a prueba estas ampliaciones, los investigadores esperan obtener pistas indirectas de una posible teoría cuántica de la gravedad.

Durante largo tiempo, los modelos de colapso han pertenecido más bien al ámbito de las discusiones filosóficas sobre el significado de la función de onda y el proceso de medida. Desde hace algunos años, sin embargo, numerosos físicos albergan la esperanza de verificar o refutar empíricamente algunas de sus predicciones. ¿Qué clase de experimentos podrían lograrlo? Todos los modelos de colapso comparten una propiedad: cuanto más fácil resulta distinguir aquellas situaciones en las que existe una superposición de estados, con mayor rapidez se desvanecen los efectos cuánticos. Sin embargo, al mismo tiempo aumentan también los efectos de la decoherencia («los grandes felinos sufren una decoherencia más rápida»), por lo que un aspecto fundamental que deben tener en cuenta estos experimentos es la posibilidad de diferenciar claramente entre ambos fenómenos. A tal fin, dos observaciones resultan de utilidad. Por un lado —y al contrario de lo que ocurre con la decoherencia—, los modelos de colapso afectan también a aquellos objetos completamente aislados de su entorno. Por otro, tal vez puedan recrearse condiciones en las que la decoherencia tradicional y un hipotético colapso dependieran de manera muy distinta de los parámetros de laboratorio, como el volumen del experimento.

La estrategia básica consiste en preparar un objeto de masa elevada en una superposición cuántica de dos o más estados y, después, intentar observar en él fenómenos de interferencia cuántica. Dichos estados deben mostrar, desde un punto de vista macroscópico, la máxima separación espacial posible. Si a escala macroscópica la naturaleza se comporta de un modo fundamentalmente distinto de como lo hace a escala microscópica, debería existir un límite más allá del cual los efectos de interferencia desapareciesen sin importar cuán aislado se encontrase el sistema.

«Ningún arte interpretativa puede convertir esta función-psi en una descripción adecuada de un hecho real», escribía Einstein a Schrödinger en 1935

ONDAS MOLECULARES Y RESONADORES MECÁNICOS

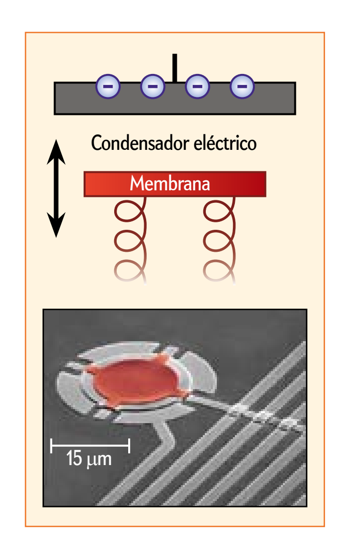
Si consideramos en detalle los distintos modelos que describen el colapso de la función de onda durante el proceso de medición, comprobaremos que las dificultades prácticas para ponerlos a prueba en el laboratorio resultan enormes. Los primeros efectos medibles de los modelos del colapso espontáneo sugeridos por Ghirardi y sus colaboradores se esperan para objetos de entre 10^5 y 10^8 unidades de masa atómica y una separación entre los estados de posición de unos 100 nanómetros. Por otro lado, los primeros efectos de la gravedad en el colapso de la función de onda deberían aparecer en cuerpos de entre 10^9 y 10^{16} unidades de masa atómica. Una posibilidad para satisfacer tales requisitos consiste en estudiar la interferencia cuántica en moléculas de gran tamaño, complejos moleculares o nanocristales. Otra, en investigar los efectos cuánticos en sistemas mecánicos de masa elevada.

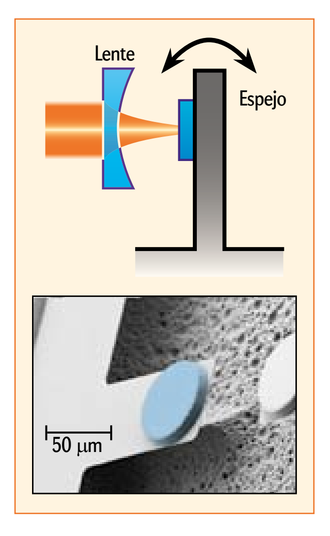
Más arriba discutíamos la difracción de moléculas de colorante con una rejilla de difracción. Durante los últimos años, numerosos investigadores han analizado diversas variantes del fenómeno de interferencia con objetos de masa elevada. La clave para llevar a cabo esta clase de experimentos se debe, en gran parte, a una idea de John Clauser, de la Universidad de California en Berkeley. Todos los interferómetros necesitan al comienzo una relación fija entre las fases de las ondas parciales que al final deberán superponerse. Sin embargo, tal relación no se da en las fuentes moleculares típicas. Solo una colocación ingeniosa de tres redes nanoestructuradas situadas una detrás de otra hace posible esta obra de arte. Primero, las partículas emitidas de manera desordenada por fuentes térmicas o de otro tipo se preestructuran y se deslocalizan mediante una red. Después, se difractan a través de una segunda red y se hacen pasar por la tercera.

A partir de dicho principio, Stefan Gerlich, Lucia Hackermüller y otros colaboradores del grupo de uno de los autores (Arndt) lograron diseñar un interferómetro molecular de Kapitza-Dirac-Talbot-Lau. Gracias a él, observaron fenómenos de interferencia con moléculas formadas por más de 400 átomos y de unas 7000 unidades de masa atómica, sintetizadas por Tüxen, Mayor y el químico de la compañía Dupont Paul Fagan. En su experimento, la función de onda de las moléculas se hallaba deslocalizada sobre una distancia más de 100 veces mayor que su diámetro molecular. Un aspecto esencial provino del empleo de redes de luz, las cuales interaccionan con las moléculas mediante efectos de polarización.

En los próximos años, la interferometría de ondas de materia con redes de luz permitirá aumentar en dos órdenes de magnitud la masa de los objetos difractados. Para partículas de entre 10^6 y 10^9 unidades de masa atómica, en la actualidad se está considerando la posibilidad de llevar a cabo tales experimentos en condiciones de ingravidez, si bien su desarrollo requerirá tiempo. Por último, la interferometría con ondas de materia podría aplicarse a la fabricación de sensores cuánticos con interesantes aplicaciones en química física, como la caracterización de las propiedades ópticas, eléctricas y magnéticas de moléculas complejas.

Membranas y espejos: **A fin de observar efectos cuánticos en objetos de decenas de micrómetros (una distancia más que considerable para los estándares cuánticos), durante los últimos años los investigadores han intentado acoplar de manera controlada sistemas ópticos a dispositivos mecánicos. Entre ellos, membranas cuyas vibraciones modulan el espesor de un condensador (*izquierda*) o espejos oscilantes (*derecha*). En ambos casos, el número de fotones que inciden sobre los objetos varía, de modo que su presión de radiación se acopla a la mecánica del dispositivo.**





CORTESÍA DE LOS AUTORES

Durante los últimos años, otro ámbito experimental que ha conocido grandes e inesperados avances ha sido la exploración de la frontera entre las leyes cuánticas y la micromecánica. Varios equipos de investigación trabajan en estos momentos para acoplar sistemas cuánticos controlados a nano- y microrresonadores, pequeños osciladores mecánicos. La idea principal se basa en ejercer el control cuántico sobre un grado de libertad mecánico, como los modos de vibración de un diminuto muelle de torsión o de una micropalanca. Ello posibilitaría nuevas aplicaciones, como sensores mecánicos ultraprecisos para la medición de distancias, fuerzas, masas o energías. Por otro lado, tal vez permitan construir mecanismos de transporte mecánico en computación cuántica a fin de acoplar qubits a circuitos electrónicos.

Tales dispositivos han abierto la puerta a un área de investigación completamente nueva. Los resonadores empleados constan de un gran número de átomos, cuyo movimiento colectivo permite investigar la superposición de estados en objetos de gran tamaño. Los trabajos de varios grupos de investigación en todo el mundo están permitiendo cubrir un abanico de masas que abarca hasta 20 órdenes de magnitud: desde nubes atómicas con unos 10^5 átomos, pasando por objetos nano- y micromecánicos de 10^{15} átomos, hasta otros con más de 10^{25} átomos y masas de varios kilogramos, como ocurre con los espejos de los detectores de ondas gravitacionales.

La idea básica es muy sencilla: transferir el estado cuántico de un sistema microscópico controlado, como un qubit, al resonador mecánico. Al contrario de lo que ocurre con un bit clásico, que solo puede tomar los valores 0 o 1, un qubit puede hallarse en una superposición simultánea de ambos estados. Así, la meta consiste en acoplarlo de la manera adecuada a un resonador para inducir en él una superposición de sus modos de vibración. Este objetivo fue logrado en 2010 por el grupo de investigación de Aaron O'Connell, Andrew Cleland y John Martinis, de la Universidad de California en Santa Bárbara, quienes observaron la interferencia cuántica de dos estados entre los que existía una separación espacial. Sin embargo, a pesar de que se trataba de un objeto formado por unos 10^{13} átomos y de masa relativamente elevada (un nanogramo), el experimento no permitió poner a prueba ninguno de los modelos de colapso mencionados, ya que la separación espacial entre dichos estados era ínfima: la millonésima parte del tamaño de un átomo.

Según la interpretación de Copenhague, la medida provoca el «colapso» de la función de onda. ¿Tiene lugar dicho colapso de manera literal, o solo efectiva?

EXPERIMENTOS ÓPTICOS

Otro enfoque experimental se basa en iluminar un objeto con partículas de luz a fin de aprovechar la presión de radiación, el efecto mecánico que ejercen los fotones al reflejarse en una superficie. Gracias a ello, las propiedades mecánicas pueden controlarse mediante efectos ópticos cuánticos con luz láser o microondas. Estas técnicas requieren suprimir al máximo la excitación térmica, a fin de que el movimiento del objeto revista un carácter cuántico.

Un método eficaz lo proporciona el enfriamiento por láser. En dos experimentos efectuados en 2011, los investigadores bombardearon una estructura mecánica con fotones y la llevaron a su estado cuántico fundamental de vibración, cuya energía dependía principalmente de la indeterminación del paquete de ondas cuántico. Un resonador óptico controlaba la cantidad de fotones que incidían sobre el objeto en función de la dirección en que se moviese. De esta manera, prácticamente cada fotón podía frenarlo («enfriarlo») poco a poco, hasta llegar al punto en que el movimiento quedase dominado por las fluctuaciones cuánticas. En uno de estos experimentos, liderado por John Teufel, del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología de EE.UU., los investigadores irradiaron con microondas una membrana oscilante de 15 micrómetros de diámetro y 100 nanómetros de grosor. En el segundo, realizado por una colaboración internacional en la que participó uno de los autores (Aspelmeyer), se empleó luz de láser para enfriar una fibra óptica hasta su estado cuántico fundamental.

El estado cuántico alcanzado en estos experimentos constituye el punto de partida para investigar, en objetos pesados, la superposición de estados separados espacialmente. En analogía con los experimentos de O'Connell, Cleland y Martinis, cabe imaginar la transferencia del estado cuántico de los fotones al objeto de gran tamaño mediante la aplicación de presión de radiación. Sin embargo, dado que el impulso que pueden transmitir los fotones es ínfimo, la separación espacial entre estados resulta minúscula.

El desafío consiste en aumentar la dimensión espacial de la superposición. Una posible estrategia, sugerida hace poco por Oriol Romero Isart y otros colaboradores del grupo de Ignacio Cirac, del Instituto Max Planck de Óptica Cuántica, consiste en acoplar los efectos cuánticos de objetos mecánicos microscópi-

cos a experimentos con ondas de materia. Estos investigadores proponen atrapar una esfera de dimensiones nanoscópicas en una jaula de luz, mantener fija su posición y, mediante técnicas de óptica cuántica, prepararla en su estado fundamental. En tal caso, la esfera podría servir como fuente para experimentos de interferometría. La técnica permitiría emplear objetos de unos 10^{10} átomos o incluso más y, con ellos, estudiar la superposición de estados separados espacialmente por distancias superiores al diámetro de las partículas.

Son varias las dificultades a las que se enfrentan tales propuestas. Por un lado, la interacción con el entorno debe reducirse al máximo para mantener los efectos de la decoherencia bajo control, ya que solo así se tornarían visibles los efectos cuánticos. Ello implica realizar los experimentos en condiciones de alto vacío y a temperaturas muy próximas al cero absoluto. En caso contrario, los fotones de longitud de onda corta transportarían demasiada información sobre la posición de la partícula. Además, la deslocalización de un objeto de masa elevada necesitaría desarrollarse sin perturbaciones durante un tiempo. En el caso de partículas de unas 10^{10} unidades de masa atómica en una doble rendija, ese tiempo se estima en varios minutos.

Por otra parte, en el caso de estructuras tan pesadas deben considerarse los efectos de la gravedad terrestre, que arrastraría el objeto hacia abajo. Para evitarlo, una técnica consiste en compensar la atracción gravitatoria con campos electromagnéticos muy homogéneos que no perturbasen la evolución de los estados cuánticos. Otra posibilidad sería llevar a cabo el experimento en un satélite o en la Estación Espacial Internacional, escenarios sin duda interesantes. La Agencia Espacial Europea ya ha comenzado a considerar esta línea de investigación. El espacio no solo ofrece un vacío muy alto y excelentes condiciones de microgravedad, sino también la posibilidad de emplear técnicas ópticas especialmente concebidas para tales casos.

En 1996, un equipo liderado por Serge Haroche recreó una versión lumínica del gato de Schrödinger compuesta por un pequeño número de fotones

GRAVITACIÓN E INCERTIDUMBRE

La experimentación en la frontera entre efectos cuánticos y gravitatorios promete una perspectiva adicional. El año pasado, Igor Pikovski, de la Universidad de Viena, y otros colaboradores, entre los que se encontraba uno de nosotros (Aspelmeyer), propusimos un experimento para poner a prueba las predicciones de ciertas teorías de gravedad cuántica. Nuestra idea pretendía estudiar las consecuencias observables de una longitud mínima en la naturaleza. Numerosas teorías predicen que el concepto de espacio perdería su significado a partir de cierta escala mínima de distancias, la cual se cree próxima la longitud de Planck (unos 10^{-35} metros).

A fin de dar cuenta de esa distancia mínima, a lo largo de los años se han propuesto varias modificaciones de la relación de incertidumbre de Heisenberg. Como mencionábamos al comienzo, esta prohíbe determinar la posición y el momento lineal de un objeto con una precisión arbitraria. Sin embargo, si renunciamos por completo a conocer el momento de una partícula, nada nos impedirá acotar su localización espacial con tanta finura como deseemos, lo cual entraría en conflicto con la existencia de una distancia mínima en la naturaleza (sea esta la longitud de Planck o cualquier otra). Para resolverlo se han propuesto varias correcciones de la relación de incertidumbre original, a fin de modificar su comportamiento a distancias muy cortas. Los efectos de tales alteraciones serían minúsculos, por lo que no cabe esperar observarlos de forma directa: hoy por hoy, los experimentos de altas energías solo pueden resolver distancias del orden de los 10^{-19} metros, 16 órdenes de magnitud por encima de la longitud de Planck.

Nuestro artículo planteaba la posibilidad de evitar tales limitaciones mediante el control óptico de objetos mecánicos. Al hacer incidir pulsos de láser muy cortos sobre un dispositivo mecánico, podrían inducirse ciertos cambios en su posición o velocidad. Después, mediante una secuencia concreta de operaciones concatenadas, el objeto se devolvería al punto de partida. Los estados inicial y final resultarían indistinguibles desde un punto de vista clásico; sin embargo, su función de onda habría adquirido una fase adicional, la cual codificaría la información sobre el camino seguido por el objeto. Lo más sorprendente reside en que dicha fase mecánica quedaría «grabada» en el campo de luz, el cual podría amplificarse mediante efectos no lineales. Ello nos permitiría medir los cambios en el valor de la fase, los cuales dependerían a su vez de las correcciones a la relación original de Heisenberg, en caso de haberlas. Al menos en principio, este experimento podría servir para poner a prueba las predicciones de ciertas teorías de gravedad cuántica a la escala de Planck, inverificables por otros medios.

¿Qué podemos aprender con la exploración de la frontera entre lo cuántico y lo macroscópico? Algo sí podemos asegurar: a corto plazo, los resultados podrán interpretarse de maneras muy distintas. Si los futuros experimentos con objetos de masa y complejidad crecientes continúan confirmando las predicciones de la teoría cuántica, el debate filosófico sobre su interpretación continuará inalterado y ciertas representaciones alternativas del mundo, como las basadas en los modelos de colapso, quedarán excluidas. Por otro lado, no menos emocionante resulta la otra posibilidad: si algún experimento llegase a mostrar desviaciones con respecto a la teoría cuántica comúnmente aceptada, nos hallaríamos ante el formidable reto de comprender el alcance de sus implicaciones.

PARA SABER MÁS

Electrodinámica cuántica en cavidades. Serge Haroche y Jean-Michel Raimond en *Investigación y Ciencia*, n.º 201, junio de 1993.

Observing the progressive decoherence of the «meter» in a quantum measurement. M. Brune et al. en *Physical Review Letters*, 77, págs. 4887-4890, 1996.

La frontera entre lo clásico y lo cuántico. Philip Yam en *Investigación y Ciencia*, n.º 251, agosto de 1997.

Quantum ground state and single-phonon control of a mechanical resonator. A. D. O'Connell et al. en *Nature*, vol. 464, págs. 697-703, 2010.

Laser cooling of a nanomechanical oscillator into its quantum ground state. J. Chan et al. en *Nature*, vol. 478, págs. 89-92, 2011. Disponible en **arxiv.org/abs/1106.3614**.

Colloquium: Quantum interference of clusters and molecules. K. Hornberger et al. en *Reviews of Modern Physics*, vol. 84, págs. 157-173, 2012.

Real-time single-molecule imaging of quantum interference. Thomas Juffmann et al. en *Nature Nanotechnology*, vol. 7, págs. 297-300, 2012.

Probing Planck-scale physics with quantum optics. I. Pikovski et al. en *Nature Physics*, vol. 8, págs. 393-397, 2012.

CATÁLOGO DE PRODUCTOS

PROMOCIONES

5 EJEMPLARES AL PRECIO DE 4

Ahorre un 20 %

5 ejemplares de *MENTE Y CEREBRO* o 5 ejemplares de *TEMAS* por el precio de 4 = 26,00 €

SELECCIONES TEMAS

Ahorre más del 30 %

Ponemos a su disposición grupos de 3 títulos de *TEMAS* seleccionados por materia.

3 ejemplares al precio de 2 = 13,00 €

1. ASTRONOMÍA
Planetas, Estrellas y galaxias, Presente y futuro del cosmos
2. BIOLOGÍA
Nueva genética, Virus y bacterias, Los recursos de las plantas
3. COMPUTACION
Máquinas de cómputo, Semiconductores y superconductores, La información
4. FÍSICA
Fronteras de la física, Universo cuántico, Fenómenos cuánticos
5. CIENCIAS DE LA TIERRA
Volcanes, La superficie terrestre, Riesgos naturales
6. GRANDES CIENTÍFICOS
Einstein, Newton, Darwin
7. MEDICINA
El corazón, Epidemias, Defensas del organismo
8. CIENCIAS AMBIENTALES
Cambio climático, Biodiversidad, El clima
9. NEUROCIENCIAS
Inteligencia viva, Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente, El cerebro, hoy
10. LUZ Y TÉCNICA
La ciencia de la luz, A través del microscopio, Física y aplicaciones del láser

TAPAS DE ENCUADERNACIÓN DE *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*

ANUAL (2 tomos) = 10,00 €
más gastos de envío = 5,00 €



Si las tapas solicitadas, de años anteriores, se encontrasen agotadas remitiríamos, en su lugar, otras sin la impresión del año.

MENTE y CEREBRO

Precio por ejemplar: 6,50€

MyC 1: Conciencia y libre albedrío
MyC 2: Inteligencia y creatividad
MyC 3: Placer y amor
MyC 4: Esquizofrenia
MyC 5: Pensamiento y lenguaje
MyC 6: Origen del dolor
MyC 7: Varón o mujer: cuestión de simetría
MyC 8: Paradoja del samaritano
MyC 9: Niños hiperactivos
MyC 10: El efecto placebo
MyC 11: Creatividad
MyC 12: Neurología de la religión
MyC 13: Emociones musicales
MyC 14: Memoria autobiográfica
MyC 15: Aprendizaje con medios virtuales
MyC 16: Inteligencia emocional
MyC 17: Cuidados paliativos
MyC 18: Freud
MyC 19: Lenguaje corporal
MyC 20: Aprender a hablar
MyC 21: Pubertad
MyC 22: Las raíces de la violencia
MyC 23: El descubrimiento del otro
MyC 24: Psicología e inmigración
MyC 25: Pensamiento mágico
MyC 26: El cerebro adolescente
MyC 27: Psicograma del terror
MyC 28: Sibaritismo inteligente
MyC 29: Cerebro senescente
MyC 30: Toma de decisiones
MyC 31: Psicología de la gestación
MyC 32: Neuroética
MyC 33: Inapetencia sexual
MyC 34: Las emociones
MyC 35: La verdad sobre la mentira
MyC 36: Psicología de la risa
MyC 37: Alucinaciones
MyC 38: Neuroeconomía
MyC 39: Psicología del éxito
MyC 40: El poder de la cultura
MyC 41: Dormir para aprender
MyC 42: Marcapasos cerebrales
MyC 43: Deconstrucción de la memoria
MyC 44: Luces y sombras de la neurodidáctica
MyC 45: Biología de la religión
MyC 46: ¡A jugar!
MyC 47: Neurobiología de la lectura
MyC 48: Redes sociales
MyC 49: Presiones extremas
MyC 50: Trabajo y felicidad
MyC 51: La percepción del tiempo
MyC 52: Claves de la motivación
MyC 53: Neuropsicología urbana
MyC 54: Naturaleza y psique
MyC 55: Neuropsicología del yo
MyC 56: Psiquiatría personalizada
MyC 57: Psicobiología de la obesidad
MyC 58: El poder del bebé
MyC 59: Efectos del estrés

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN

Edición en rústica

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
012-3	El sistema solar	12 €
016-6	Tamaño y vida	14 €
025-5	La célula viva	32 €
038-7	Matemática y formas óptimas	21 €

Edición en tela

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
004-2	La diversidad humana	24 €
013-1	El sistema solar	24 €
015-8	Partículas subatómicas	24 €
017-4	Tamaño y vida	24 €
027-1	La célula viva (2 tomos)	48 €
031-X	Construcción del universo	24 €
039-5	Matemática y formas óptimas	24 €
046-8	Planeta azul, planeta verde	24 €
054-9	El legado de Einstein	24 €

TEMAS de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

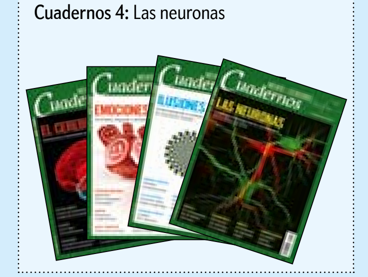
Precio por ejemplar: 6,50€

T-4: Máquinas de cómputo
T-6: La ciencia de la luz
T-7: La vida de las estrellas
T-8: Volcanes
T-9: Núcleos atómicos y radiactividad
T-12: La atmósfera
T-13: Presente y futuro de los transportes
T-14: Los recursos de las plantas
T-15: Sistemas solares
T-16: Calor y movimiento
T-17: Inteligencia viva
T-18: Epidemias
T-20: La superficie terrestre
T-21: Acústica musical
T-22: Trastornos mentales
T-23: Ideas del infinito
T-24: Agua
T-25: Las defensas del organismo
T-26: El clima
T-27: El color
T-29: A través del microscopio
T-30: Dinosaurios
T-31: Fenómenos cuánticos
T-32: La conducta de los primates
T-33: Presente y futuro del cosmos
T-34: Semiconductores y superconductores
T-35: Biodiversidad
T-36: La información
T-37: Civilizaciones antiguas
T-38: Nueva genética
T-39: Los cinco sentidos
T-40: Einstein
T-41: Ciencia medieval
T-42: El corazón
T-43: Fronteras de la física
T-44: Evolución humana
T-45: Cambio climático
T-46: Memoria y aprendizaje
T-47: Estrellas y galaxias
T-48: Virus y bacterias
T-49: Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente
T-50: Newton
T-53: Planetas
T-54: Darwin
T-55: Riesgos naturales
T-56: Instinto sexual
T-57: El cerebro, hoy
T-58: Galileo y su legado
T-59: ¿Qué es un gen?
T-60: Física y aplicaciones del láser
T-61: Conservación de la biodiversidad
T-62: Alzheimer
T-63: Universo cuántico
T-64: Lavoisier, la revolución química
T-65: Biología marina
T-66: La dieta humana: biología y cultura
T-67: Energía y sostenibilidad
T-68: La ciencia después de Alan Turing
T-69: La ciencia de la longevidad
T-70: Orígenes de la mente humana

MENTE y CEREBRO Cuadernos

Precio por ejemplar: 6,90€

Cuadernos 1: El cerebro
Cuadernos 2: Emociones
Cuadernos 3: Ilusiones
Cuadernos 4: Las neuronas



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,50€





GASTOS DE ENVÍO

(Añadir al importe del pedido)

	España	Otros países
1er ejemplar	2,00 €	4,00 €
Por cada ejemplar adicional	1,00 €	2,00 €

Puede efectuar su pedido a través del cupón que se inserta en este número, llamando al 934 143 344 o a través de nuestra Web:
www.investigacionyciencia.es

Las ofertas son válidas hasta agotar existencias.

FASES CUÁNTICAS Y TEORÍA DE CUERDAS

Algunas transiciones entre fases cuánticas de la materia incorporan lo que Einstein denominó «espeluznante acción a distancia». Su descripción matemática guarda relación con un área de la física sin relación aparente: la teoría de cuerdas

Subir Sachdev



Un imán levita sobre un superconductor (*no mostrado en la imagen*) en el que billones de electrones forman un vasto estado cuántico entrelazado. Por sorprendente que parezca, las propiedades cuánticas de ciertos materiales guardan una sutil relación con la descripción matemática de los agujeros negros.

Subir Sachdev es profesor de física en Harvard y autor del libro *Quantum phase transitions* (Cambridge University Press, 2011), ahora en su segunda edición.



Hace algunos años me hallé a mí mismo en un lugar completamente inesperado: una conferencia sobre teoría de cuerdas. Mi campo de investigación es la materia condensada, el estudio de materiales como metales y superconductores a temperaturas próximas al cero absoluto. Esta disciplina se halla todo lo lejos de la teoría de cuerdas como podría estarlo sin salirse de la física. La teoría de cuerdas intenta describir la naturaleza a energías mucho mayores que las que pueden alcanzarse en los laboratorios terrestres o, de hecho, en cualquier lugar del universo conocido. Quienes a ella se dedican estudian las exóticas leyes que gobiernan los agujeros negros y postulan que el universo posee otras dimensiones espaciales, además de las tres que podemos ver. Para ellos, la gravedad constituye la interacción dominante de la naturaleza. Para mí, no desempeña ningún papel.

Esas diferencias se plasman en un abismo cultural. Los investigadores en teoría de cuerdas gozan de una excelente reputación, por lo que asistí a aquella conferencia con un temor casi reverencial a su pericia matemática. Había invertido meses en la lectura de artículos y libros sobre el tema, a menudo quedándome empantanado. Estaba seguro de que sería rechazado como un advenedizo ignorante. Por su parte, los teóricos de cuerdas tenían dificultades con algunos de los conceptos más simples de mi campo. Llegué a verme dibujando esquemas que con anterioridad solo había empleado con mis estudiantes de doctorado primerizos.

Así pues, ¿por qué había asistido? Durante los últimos años, los expertos en materia condensada hemos observado que algunos materiales pueden comportarse de un modo que hasta ahora juzgábamos imposible. Se trata de fases marcadamente cuánticas de la materia cuya estructura se caracteriza por la aparición de uno de los fenómenos más chocantes de la naturaleza: el entrelazamiento cuántico. En un célebre artículo escrito en 1935, Albert Einstein, Boris Podolsky y Nathan Rosen señalaron que la teoría cuántica implicaba la existencia de ciertas conexiones «espeluznantes» entre partículas. Cuando aparecen, las partículas se coordinan sin que haya entre ellas una acción física directa. Einstein y sus colaboradores consideraron el caso de dos electrones, pero un metal o un superconductor contienen muchísimos más: del orden de 10^{23}, en una muestra de laboratorio típica. La complejidad que exhiben algunos materiales resulta sobrecogedora, y a ella he dedicado gran parte de mi carrera. Pero el problema no se reduce a lo meramente académico: los superconductores revisten una enorme importancia técnica, por lo que se han dedicado ingentes esfuerzos a entender sus propiedades y su potencial.

Hace unos años descubrimos que la teoría de cuerdas nos brindaba una manera completamente inesperada de enfocar el problema. En su camino hacia una formulación que unifique las interacciones cuánticas entre partículas y la teoría de la gravedad de Einstein, los físicos de cuerdas se han topado con lo que ellos denominan «dualidades»: relaciones ocultas entre áreas de la física muy apartadas entre sí. Las dualidades que nos interesan relacionan dos tipos de teorías: por un lado, las que funcionan bien cuando los fenómenos cuánticos no resultan significativos pero la gravedad es muy intensa; por otro, aquellas que describen efectos cuánticos fuertes en situaciones con campos gravitatorios débiles [*véase* «El espacio, ¿una ilusión?», por Juan Maldacena; Investigación y Ciencia, enero de 2006]. Esta equivalencia permite traducir los hallazgos realizados en un campo al otro. Gracias a ella, descubrimos que podíamos expresar nuestras preguntas sobre el entrelazamiento en términos de un problema gravitatorio para, después, servirnos de los descubrimientos que los físicos de cuerdas habían realizado sobre las matemáticas de los agujeros negros. Un ejemplo de pensamiento lateral refinado al máximo.

FASES OCULTAS

Para entender ese círculo de ideas debemos volver por un momento a la física del bachillerato. Según esta, las fases de la materia corresponden a los estados sólido, líquido y gaseoso. Un sólido posee tamaño y forma fijos; un líquido toma la forma del recipiente que lo contiene; y los gases, aunque se parecen en este último aspecto a los líquidos, pueden alterar su volumen con facilidad. Aunque se trata de conceptos simples, hasta prin-

EN SÍNTESIS

La materia puede presentarse en muchas otras fases aparte de sólido, líquido y gas. Los electrones de un material pueden sufrir transiciones, las cuales dependen de las propiedades cuánticas de este. Los superconductores constituyen el ejemplo más conocido.

Algunas de esas fases aparecen cuando los electrones de un cristal conforman un vasta red formada por billones de partículas mutuamente entrelazadas. Durante años, la complejidad de esas redes ha traído de cabeza a los expertos en física de la materia condensada.

Una nueva formulación matemática del problema procede de un área de investigación completamente inesperada: la teoría de cuerdas. Desde un punto de vista formal, las dimensiones extra y los agujeros negros están ayudando a describir dichas transiciones de fase.

ZACHARY ZAVISLAK (*páginas anteriores*)

cipios del siglo xx carecíamos de un entendimiento preciso de las fases de la materia. Los átomos se disponen de manera ordenada en los sólidos cristalinos, pero pueden moverse en líquidos y gases.

Sin embargo, las tres fases anteriores no bastan en absoluto para describir todos los aspectos de la materia. Un sólido no se compone solo de una red de átomos, sino también de un enjambre de electrones. Cada átomo libera unos pocos electrones que pueden pulular por todo el cristal. Cuando conectamos una batería a un pedazo de metal, la corriente eléctrica fluye por él. Casi todos los materiales obedecen la ley de Ohm: la intensidad de la corriente es igual al voltaje aplicado dividido por la resistencia del material. Los aislantes, como el teflón, presentan una resistencia muy elevada; en los metales, la resistencia es baja. Los superconductores destacan por poseer una resistencia inconmensurablemente pequeña. En 1911, Heike Kamerlingh Onnes descubrió el fenómeno al refrigerar mercurio sólido a 4 grados Kelvin (269 grados Celsius bajo cero). Hoy conocemos materiales en los que la superconductividad aparece a temperaturas mucho mayores (hasta 138 grados Celsius bajo cero).

Aunque tal vez no resulte obvio, conductores, aislantes y superconductores representan fases diferentes de la materia. El enjambre de electrones que los caracteriza adquiere en cada caso propiedades distintas. Durante las dos últimas décadas, hemos descubierto que los sólidos poseen fases electrónicas adicionales. Entre ellas, una especialmente interesante que, de tan insólita, ni siquiera tiene nombre: los físicos hemos dado en llamarla «metal extraño». Se caracteriza por una dependencia inusual entre su resistencia eléctrica y su temperatura.

Las fases mencionadas se diferencian en el comportamiento colectivo de los electrones. En sólidos, líquidos y gases, el movimiento de los átomos puede describirse en gran parte de los casos sin más herramientas que la mecánica de Newton. Sin embargo, para explicar las propiedades de los electrones debemos recurrir a la mecánica cuántica. Las leyes que gobiernan los electrones de un sólido constituyen una versión ampliada de las que rigen su comportamiento en un átomo. En este último caso, el movimiento del electrón queda descrito por una onda que se propaga en torno al núcleo. La partícula puede encontrarse en un número infinito de estados, caracterizados por valores específicos de sus propiedades observables, como la energía. Pero el electrón no se limita a orbitar en torno al núcleo. Además, rota sobre su propio eje. Dicho giro puede tomar un sentido o el opuesto, pero no puede acelerarse ni frenarse. Esos dos estados de giro, o espín, suelen denominarse «arriba» y «abajo».

En los átomos que cuentan con más de un electrón, la regla más importante que rige su comportamiento es el principio de exclusión de Pauli, el cual prohíbe que dos electrones ocupen el mismo estado cuántico. (Dicho principio se aplica a todos los fermiones, o partículas de materia.) Si se van añadiendo electrones a un átomo, cada uno de ellos ocupará el estado de menor energía que se encuentre vacante. A modo de analogía, podemos compararlo con lo que ocurre al verter agua en un vaso, donde el líquido va llenando el recipiente de abajo arriba.

El mismo razonamiento se aplica a los 10^{23} electrones de una muestra de metal. Los electrones viajeros, una vez que han abandonado el seno del átomo que los alojaba, ocupan estados que se extienden por todo el cristal. Dichos estados pueden entenderse como ondas sinusoidales cuya longitud de onda está relacionada con su energía. Los electrones van ocupando los estados de energía más baja posible que les permite el principio de exclusión. Por regla general, el conjunto de electrones acabará llenando todos los estados cuya energía se halle por debajo de cierto umbral, denominado energía de Fermi.

Al aplicar un voltaje, algunos electrones adquirirán energía suficiente para pasar a un estado previamente desocupado y de energía superior al nivel de Fermi, tras lo cual podrán moverse con libertad. En un aislante, la densidad de electrones es tal que todos los estados ya se encuentran ocupados: incluso si aplicamos un voltaje, no quedan estados vacantes a los que el electrón pueda dirigirse, por lo que no se crea ninguna corriente.

En los superconductores la situación reviste mayor complejidad. Sus electrones no pueden tratarse como partículas individuales, sino que se asocian en pares que se comportan como una sola entidad, tal y como describe la teoría de la superconductividad que en 1957 desarrollaron John Bardeen, Leon Cooper y John Robert Schrieffer (BCS). A primera vista, esos tándems de electrones pueden parecer extraños, ya que ambas partículas deberían repelerse. Sin embargo, las vibraciones de la red cristalina crean, de manera indirecta, una fuerza atractiva que vence su repulsión mutua. Ello añade una particularidad: cada par de electrones no se comporta como un fermión, sino como un bosón, un tipo de partícula diferente. Los bosones no obedecen el principio de exclusión de Pauli, por lo que todos los pares de electrones de un superconductor pueden aglomerarse en el estado de mínima energía, lo que da lugar a un fenómeno conocido como condensación de Bose-Einstein. Vendría a ser como verter agua en un vaso y observar que, en vez de llenarse, se forma una fina capa de hielo en el fondo que absorbe tanta agua como deseemos sin aumentar su espesor.

Si a un material de tales características le aplicamos un voltaje, veremos que este promociona los pares de electrones hacia un estado que posee una diminuta cantidad de energía adicional, con lo que se genera una corriente eléctrica. Dicho estado de energía superior se encuentra por lo demás vacío, por lo que nada impide el flujo de pares y el superconductor transmite la corriente sin oponer resistencia.

PUNTOS CRÍTICOS

A principios de los años ochenta, el éxito de la mecánica cuántica a la hora de explicar las propiedades de metales, aislantes, superconductores y otros materiales, como los semiconductores (la base de la electrónica moderna) generó la sensación de que ya no quedaban grandes descubrimientos por hacer. Esa convicción se vino abajo cuando aparecieron los superconductores de altas temperaturas.

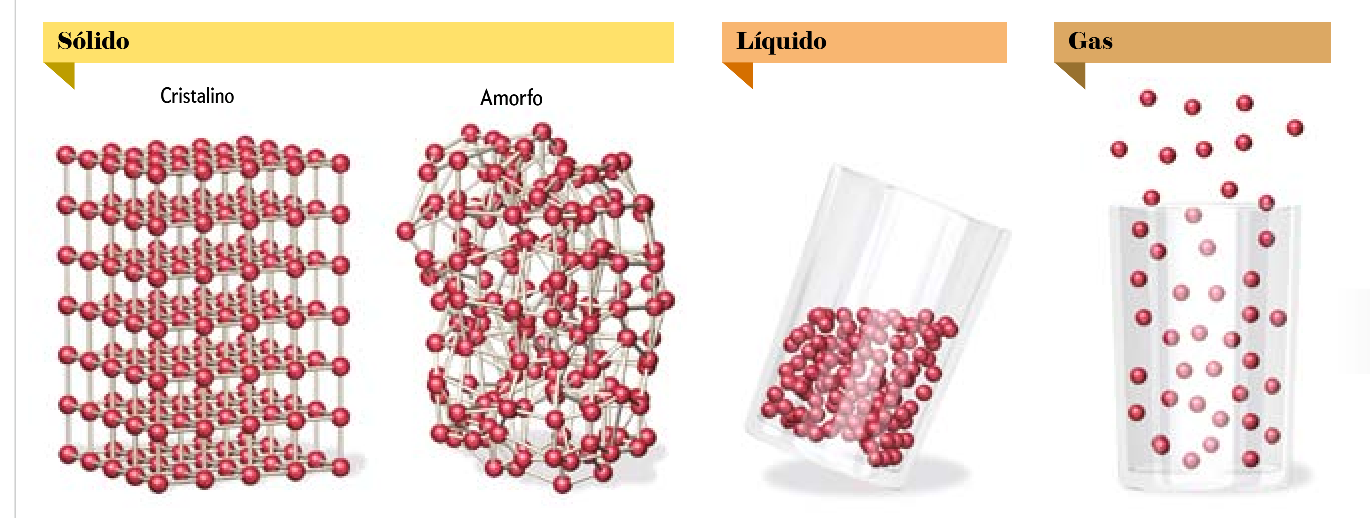
Un ejemplo nos lo proporciona el arseniuro de hierro y bario cuando una fracción del arsénico ha sido reemplazada por fósforo. A bajas temperaturas, este material se comporta como un superconductor. Se cree que obedece una teoría similar a la propuesta por BCS, pero en la que los pares de electrones no se crean por las vibraciones de la red cristalina, sino por efectos debidos a la física del espín. Al añadir algo de fósforo, el material genera un estado conocido como onda de densidad de espín [*véase* «Ondas de densidad de carga y de espín», por Stuart Brown y George Grüner; Investigación y Ciencia, junio de 1994]. En la mitad de los nodos ocupados por átomos de hierro, resulta más probable que el espín del electrón apunte hacia arriba; en la otra mitad, lo más probable es que apunte hacia abajo. Cuando se aumenta la cantidad de fósforo, la intensidad de la onda de densidad de espín disminuye, hasta desaparecer por completo cuando se ha sustituido por fósforo una fracción crítica de arsénico (en torno a un 30 por ciento). Al llegar a ese punto, el espín del electrón en cada nodo presenta la misma probabilidad de en-

ESTADOS DE LA MATERIA

Fases clásicas y cuánticas

Las fases clásicas de la materia (sólida, líquida y gaseosa) se corresponden con los diferentes modos de organización que pueden adoptar los átomos o moléculas de un cuerpo en función de la temperatura y otros parámetros. Las fases cuánticas hacen referencia a la organización colectiva de los electrones en un material. Describen estados como aislante, conductor o superconductor, entre otros.

Fases clásicas Los sólidos exhiben un tamaño y una forma fijos. En los sólidos cristalinos, las moléculas se ordenan en los nodos de una red regular y rígida; en los sólidos amorfos se encuentran desordenadas, pero sus posiciones son estables. Los líquidos poseen un volumen fijo y una forma variable. Sus moléculas pueden desplazarse con cierta libertad, pero conservan algunos vínculos mutuos. En los gases, tanto la forma como el volumen pueden cambiar. Sus moléculas cuentan con una movilidad casi total y sus interacciones mutuas son nulas o muy débiles. Al alcanzar una temperatura y presión determinadas, o punto crítico, las fases líquida y gaseosa se tornan indistinguibles (*derecha*).

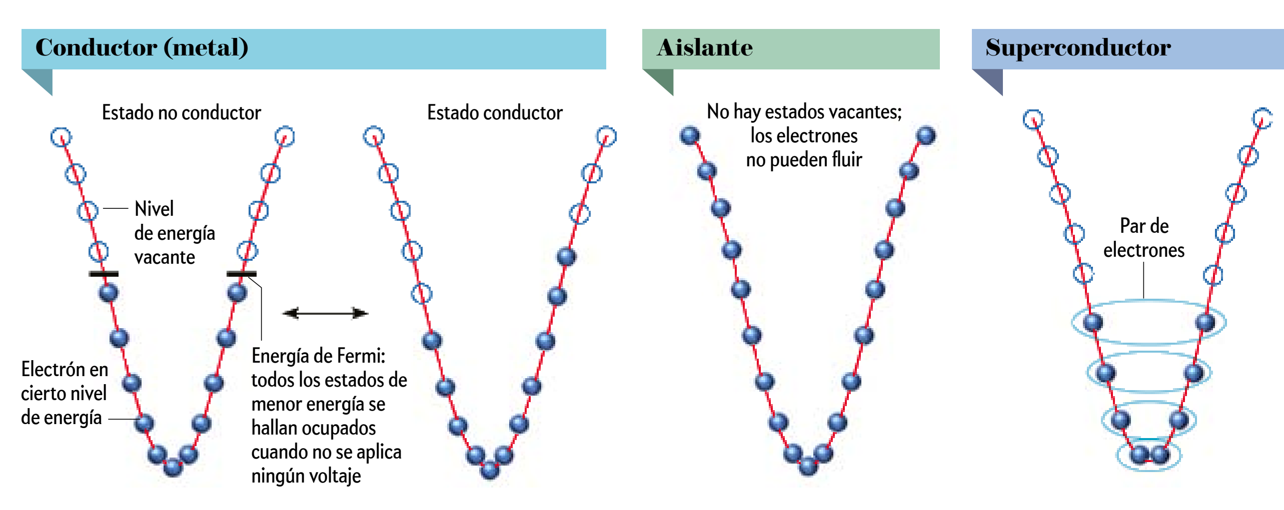


Fases cuánticas Los metales conducen fácilmente la electricidad, ya que una fracción de sus electrones puede saltar de átomo en átomo. El principio de exclusión de Pauli impide que dos electrones ocupen el mismo estado cuántico, pero si los átomos disponen de un número suficiente de estados vacantes, los electrones podrán moverse con libertad, al igual que las moléculas de un gas.

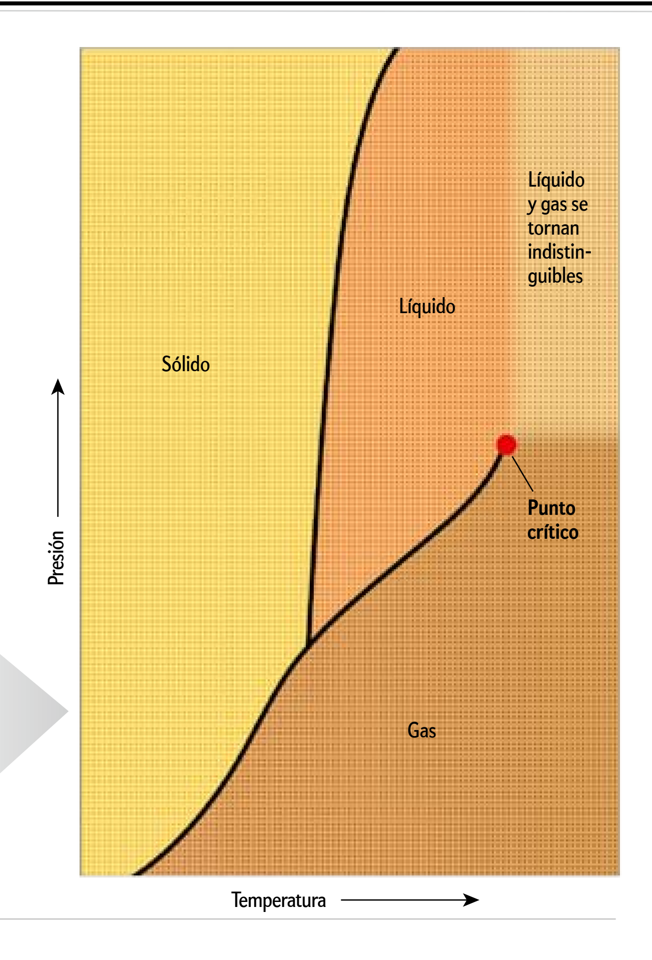
Los aislantes apenas conducen la electricidad. Sus átomos no proveen suficientes estados vacantes para los electrones viajeros, de modo que estos quedan atrapados en su lugar, tal y como sucede con las moléculas en un sólido.

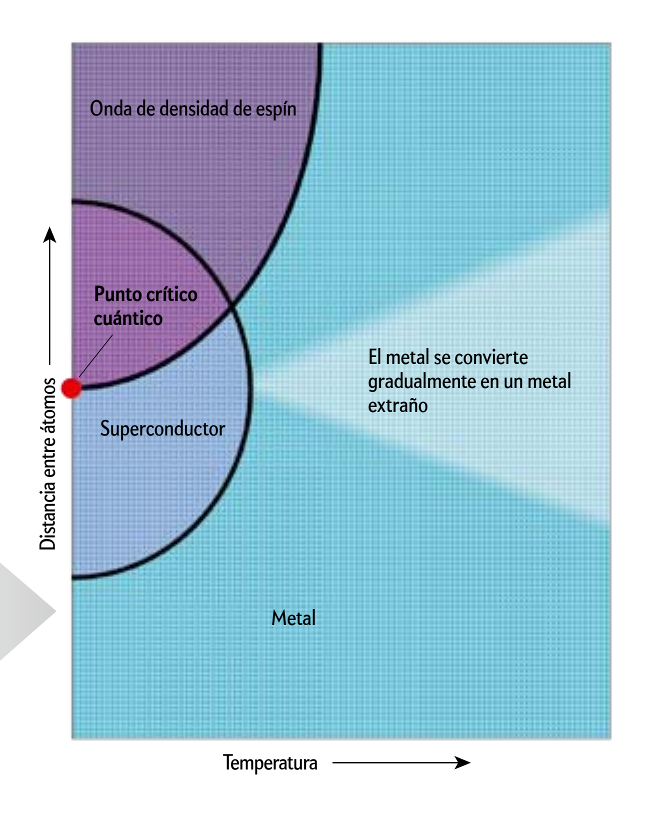
Los superconductores también se asemejan a un gas, pero no de electrones, sino de pares de electrones que se comportan como una sola entidad. Ese emparejamiento puede aparecer como consecuencia de los efectos del espín o a raíz de las vibraciones mecánicas que se propagan por el sustrato atómico. Dichos pares no obedecen el principio de exclusión de Pauli, por lo que todos ellos pueden ocupar el mismo estado cuántico. Ello elimina las restricciones que impiden el movimiento de los electrones y les permite fluir sin resistencia alguna.

Una onda de densidad de espín (*no representada aquí*) es un estado en el que el espín de los electrones conforma un patrón peculiar: en filas alternas, la mitad de ellos apunta en un sentido y la otra mitad, en el opuesto. Cuando la probabilidad de que el espín de un electrón apunte en uno u otro sentido toma el valor 1/2, puede emerger un nuevo estado de la materia, llamado «metal extraño». En él, todos los electrones de la muestra se encuentran entrelazados y no se comportan como partículas individuales ni como pares, sino como una gran masa de billones de ellos.



GEORGE RETSECK





contrarse en cualquiera de los dos estados, con consecuencias notables.

La misteriosa naturaleza de ese estado cuántico crítico se manifiesta cuando mantenemos fija la fracción de fósforo en el 30 por ciento e incrementamos la temperatura. El resultado no es un superconductor ni una onda de densidad de espín, sino un metal extraño.

Para describir ese punto crítico cuántico hemos de utilizar el fenómeno que tanto inquietaba a Einstein, Podolsky y Rosen: el entrelazamiento. El entrelazamiento entre dos electrones puede entenderse como una superposición de dos estados: uno en el que un electrón gira en un sentido y el otro en el sentido opuesto, y el estado contrario. Dos electrones son indistinguibles incluso en principio, de modo que resulta imposible decir cuál de ellos gira en un sentido y cuál en el opuesto. Ambos cuentan con la misma probabilidad de encontrarse en uno de los dos estados. Lo único que podemos afirmar es que, si medimos el espín de un electrón y obtenemos el estado «arriba», podemos garantizar que al medir el otro el resultado será «abajo». Sus espines están perfectamente anticorrelacionados: si conocemos el estado del primero, sabremos también el del segundo.

A primera vista, el entrelazamiento podría no parecer tan extraño. Supongamos que alguien toma nuestro par de zapatos y esconde uno en el recibidor y otro en el pasillo. Si encontramos un zapato en el recibidor y se trata del izquierdo, podremos garantizar que el que aún nos falta es el derecho. Pero el entrelazamiento cuántico difiere en un aspecto esencial: un mismo zapato corresponde siempre al pie derecho o siempre al izquierdo, aunque no sepamos de cuál se trata. Pero el espín del electrón no se encuentra bien definido hasta que no lo medimos. En cierto sentido, podemos decir que se halla en ambos estados a la vez y que, solo al medirlo, lo forzamos a elegir entre uno de los dos estados.

La pregunta es cómo pueden los electrones mostrar siempre una anticorrelación perfecta. Cuando uno de ellos «elige» su espín, el otro también lo hace. Pero ¿cómo sabía que su espín debía tomar un sentido opuesto al del primero? Se diría que el estado cuántico del primer electrón es conocido al instante por el segundo, sin importar cuán lejos se encuentre. La clave reside en que ningún electrón posee un estado cuántico propio: solo el par lo tiene. En ello radica la no localidad cuántica del fenómeno, la «espeluznante acción a distancia» que Einstein encontraba tan difícil de digerir.

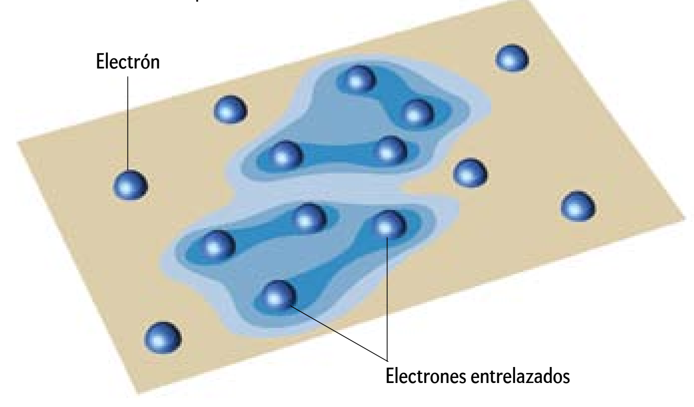
Indigesta o no, esa no localidad ha sido verificada en innumerables experimentos. Durante la última década, hemos descubierto que dicho fenómeno explica las sorprendentes propiedades de los metales extraños. Cerca del punto crítico cuántico, los electrones dejan de comportarse como partículas individuales o como pares y todo el conjunto adopta un estado entrelazado. El mismo razonamiento que Einstein, Podolsky y Rosen emplearon para dos partículas se aplica ahora a los 10^{23} electrones de la muestra. Dos electrones colindantes se hallan entrelazados; a su vez, ese par se entrelaza con pares vecinos, y así sucesivamente. El resultado es una vasta red de interconexiones cuánticas.

El mismo fenómeno se da también en otros materiales. Clasificar y caracterizar dichos estados entrelazados supone un reto abrumador. La red resulta tan vasta y compleja que describirla por medios directos supera nuestras capacidades. Pensábamos que nunca conseguiríamos formular una teoría de las fases cuánticas de la materia. Entonces descubrimos la teoría de cuerdas.

CONEXIÓN CON LA TEORÍA DE CUERDAS

Red de entrelazamientos

Por razones que los expertos aún no comprenden en profundidad, la descripción matemática de las fases cuánticas de la materia contiene una dimensión espacial «latente» que emerge durante ciertas transiciones de fase. Esa dimensión se hace evidente al describir el entrelazamiento cuántico de los electrones del material cerca del punto crítico.



Entrelazamiento de electrones
El entrelazamiento significa que varias partículas actúan como una sola entidad. Los casos más habituales afectan a dos partículas o a unas pocas de ellas. Sin embargo, durante las transiciones de fase cuánticas, el entrelazamiento tiene lugar entre billones de electrones.

CUERDAS Y ENTRELAZAMIENTO

En apariencia, la teoría de cuerdas no guarda ninguna relación con los electrones entrelazados. La teoría postula la existencia de cuerdas microscópicas que vibran como las de una guitarra. Cada modo de vibración (las distintas «notas») se correspondería con las diferentes especies de partículas elementales. Esas cuerdas serían tan diminutas que su naturaleza solo se haría evidente a energías extraordinariamente elevadas, como las que caracterizaron los primeros instantes tras la gran explosión que dio origen al universo, o aquellas que reinan en las inmediaciones de agujeros negros muy densos. A mediados de los años noventa, algunos teóricos de cuerdas, como Joseph Polchinski, del Instituto Kavli de Física Teórica de Santa Bárbara, demostraron que la teoría predecía la existencia de más objetos, además de cuerdas. Incluye también *branas*, superficies a las que los extremos de las cuerdas pueden adherirse. Tales membranas generalizadas constituyen por sí solas un nuevo y vasto reino de la física, que va mucho más allá de los fenómenos de partículas que la teoría original pretendía explicar.

Así, lo que se nos aparece una partícula (un punto) bien podría ser el extremo de una cuerda que se extiende desde una brana hacia una nueva dimensión del espacio. Podemos concebir nuestro universo bien como compuesto de partículas que viven en un espaciotiempo de cuatro dimensiones, o bien como hecho de cuerdas que se mueven en un espaciotiempo de cinco dimensiones. Ambas perspectivas proporcionan descripciones equivalentes, o duales, de la misma situación. Un hecho notable es que ambos puntos de vista resultan complementarios: cuando las partículas se comportan de manera irremisiblemente compleja, la descripción en términos de cuerdas puede ser sencilla, y viceversa.

Para mis propósitos, la imagen de un conjunto de cuerdas bailando en un espaciotiempo con dimensiones suplementarias no reviste especial interés. Tampoco me preocupa si la teoría de cuerdas proporciona o no una explicación fidedigna de la física de partículas. Lo relevante es que las dualidades nos permiten reformular un problema matemáticamente intratable en otro mucho más sencillo.

Hasta hace poco, las únicas conferencias a las que asistía versaban sobre física de la materia condensada. Ahora me encuentro a mí mismo tomando café con teóricos de cuerdas, intentando entender su abstracta y extravagante descripción de cuerdas y branas, e intentando aplicar tales ideas a los problemas mucho más prosaicos que nos plantean los nuevos materiales. Este diálogo resulta enriquecedor para ambas partes. Creo que nuestra intuición y pericia experimental con las fases cuánticas de la materia está ayudando a los teóricos de cuerdas a describir los agujeros negros y otros objetos exóticos.

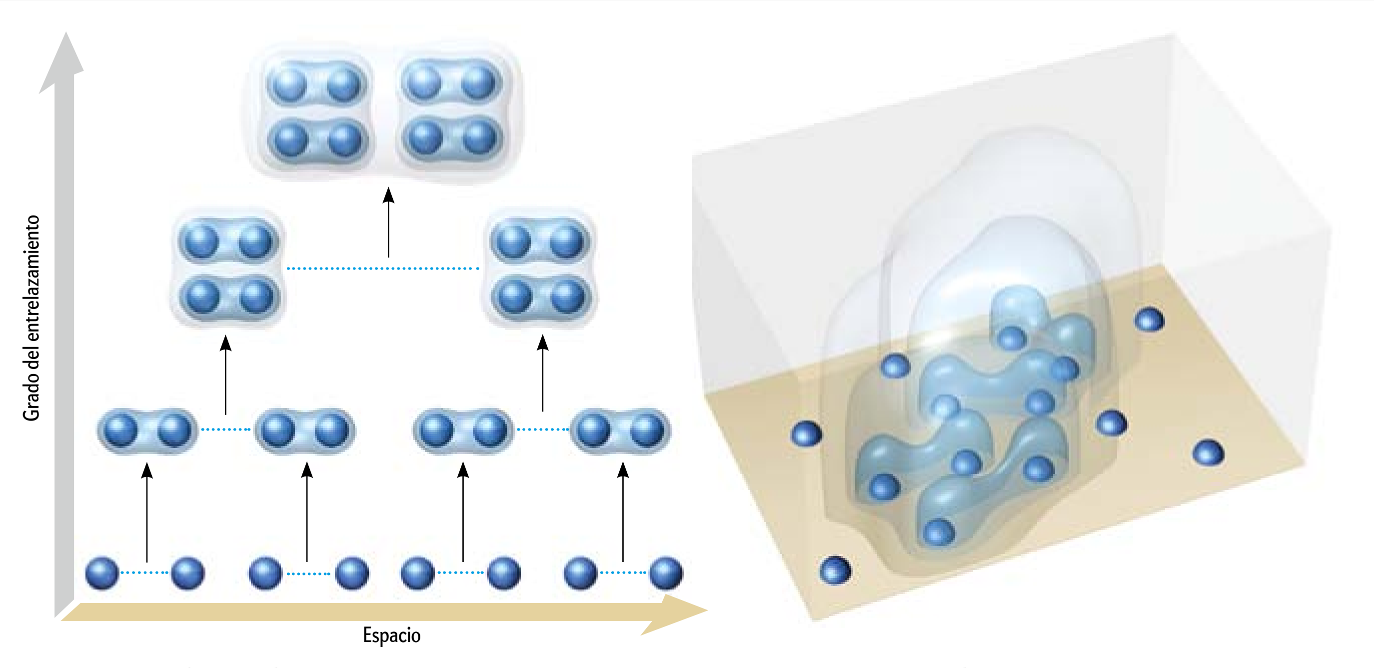
Cuando los electrones de un cristal exhiben un grado moderado de entrelazamiento, aún podemos tratarlos como partículas, ya sea como electrones individuales o como pares de ellos. Pero cuando un gran número de electrones quedan entrelazados, ya no podemos considerarlos como tales. La teoría estándar se topa con múltiples dificultades para realizar predicciones. En tales casos, describimos estos sistemas en términos de cuerdas que se propagan en una dimensión extra del espacio.

Brian Swingle, colaborador mío en Harvard, ha formulado una analogía entre la red de entrelazamientos cuánticos y una dimensión espacial extra. Desde un punto de vista matemático, variar el grado de entrelazamiento entre los elementos de la red equivale a desplazarse a lo largo de esa dimensión extra. En ella, las cuerdas pueden colear y fusionarse, y su dinámica refleja la evolución del entrelazamiento de los electrones. Las conexiones espeluznantes que tanto inquietaron a Einstein cobran sentido cuando el grado de entrelazamiento se interpreta como una distancia a lo largo de una dimensión espacial suplementaria.

PRIMOS EXTRAÑOS

La importancia práctica de la dualidad descrita radica en que, durante los últimos años, los teóricos de cuerdas han hallado una gran cantidad de soluciones matemáticas que describen fenómenos diversos, desde la dinámica de las partículas en la fragua de la gran explosión hasta las ondulaciones de los campos cuánticos en la vecindad de un agujero negro. Quienes estudiamos las fases cuánticas de la materia podemos acudir a esa ingente biblioteca de soluciones, buscar aquellas que nos interesan y traducirlas, con las herramientas matemáticas que nos brindan las dualidades, al lenguaje del entrelazamiento.

De ordinario, solemos fijarnos en el estado de energía más baja a la temperatura de cero grados Kelvin. Sin embargo, podemos también describir los estados de la materia a temperaturas distintas de cero mediante una estrategia que tal vez se antoje drástica: incluir un agujero negro en la formulación del problema en términos de cuerdas. Que debamos incluir un objeto tan exótico como un agujero negro realza lo extraordinario de estas dualidades. En absoluto estamos sugiriendo que las fases cuánticas de la materia contengan agujeros negros en un sentido literal. La relación reviste una sutileza mayor. En la década de los setenta, Stephen Hawking demostró que todo agujero negro posee una temperatura; desde el exterior, estos objetos muestran un comportamiento parecido al de un pedazo de carbón calien-



Jerarquía de entrelazamientos
El proceso de entrelazamiento puede describirse como un movimiento a lo largo de una dimensión. En el espacio, desplazarse de un punto a otro implica discurrir por todos los puntos intermedios. De manera similar, pasar del entrelazamiento de dos partículas al de billones de ellas requiere que un par se combine con otro, que el conjunto resultante lo haga con otro grupo, y así sucesivamente.

Dimensión espacial extra
El grado de entrelazamiento actúa como una dimensión espacial implícita, adicional a las tres dimensiones reales en las que viven los electrones. A partir de esta analogía matemática, el estudio de las transiciones de fase cuánticas puede servirse de ciertos resultados obtenidos en teoría de cuerdas, la cual postula la existencia de dimensiones suplementarias del espacio.

GEORGE RETSECK

te. Bajo la lógica de nuestra dualidad, el sistema de materia condensada correspondiente debe también adquirir cierta temperatura, la cual induce la transición de una onda de densidad de espín o un superconductor a un metal extraño.

Tales métodos nos han permitido progresar en nuestro entendimiento de los metales extraños y otros estados de la materia. Pero donde más nos han ayudado es en el estudio de la transición de superfluido a aislante. Un superfluido se asemeja a un superconductor, solo que compuesto de átomos neutros: en lugar de poseer una resistencia eléctrica nula, las partículas de un superfluido se mueven sin fricción. Durante los últimos años se han desarrollado nuevos métodos para crear superfluidos artificiales. Se construye una red de láseres entrecruzados y se vierten billones de átomos a temperaturas ultrafrías. Al principio, los átomos se comportan como un superfluido y se desplazan sin fricción entre los nodos de la red. Al aumentar la intensidad de los láseres, pierden su movilidad y el superfluido se convierte de súbito en un aislante.

Esa transición se estudia midiendo la manera en que fluyen los átomos cuando se los somete a una presión externa. En la fase superfluida, discurren sin experimentar resistencia; en la fase aislante, apenas se mueven; y durante la transición, fluyen de un modo peculiar. Si se suprime la perturbación externa, los átomos se detienen a un ritmo que depende de la temperatura y de la constante de Planck (el parámetro fundamental de la teoría cuántica), la cual no aparece en la descripción de las otras fases. Este comportamiento puede explicarse si interpretamos el fluido en el punto crítico cuántico como el sistema dual de un agujero negro en teoría de cuerdas.

Con todo, las dualidades adolecen de una desventaja. Por su propia naturaleza, convierten una cuestión compleja en otra simple. Pero a veces no deseamos transformar un problema, sino entender su complejidad intrínseca. Las dualidades se comportan como una caja negra matemática que no ilumina los detalles de los estados entrelazados más intrincados. Tampoco nos dice cómo surgen dichos estados en los materiales reales. La explicación de lo que realmente sucede está aún en mantillas. Para quienes investigamos la dinámica electrónica de los cristales, la teoría de cuerdas nos ha brindado una perspectiva novedosa acerca de los estados cuánticos que poseen un grado muy alto de entrelazamiento. Para los teóricos de cuerdas, estos estudios han despertado su interés por las fases cuánticas de la materia, fenómenos muy alejados de la física de altas energías o de los procesos que dieron origen a nuestro universo. La singular confluencia de estas dos corrientes de pensamiento nos ha mostrado la maravillosa unidad de la naturaleza.

PARA SABER MÁS

Solving quantum field theories via curved spacetimes. Igor R. Klebanov y Juan M. Maldacena en *Physics Today*, vol. 62, n.º 1, págs. 28-33, enero de 2009. Disponible en **dx.doi.org/10.1063/1.3074260**

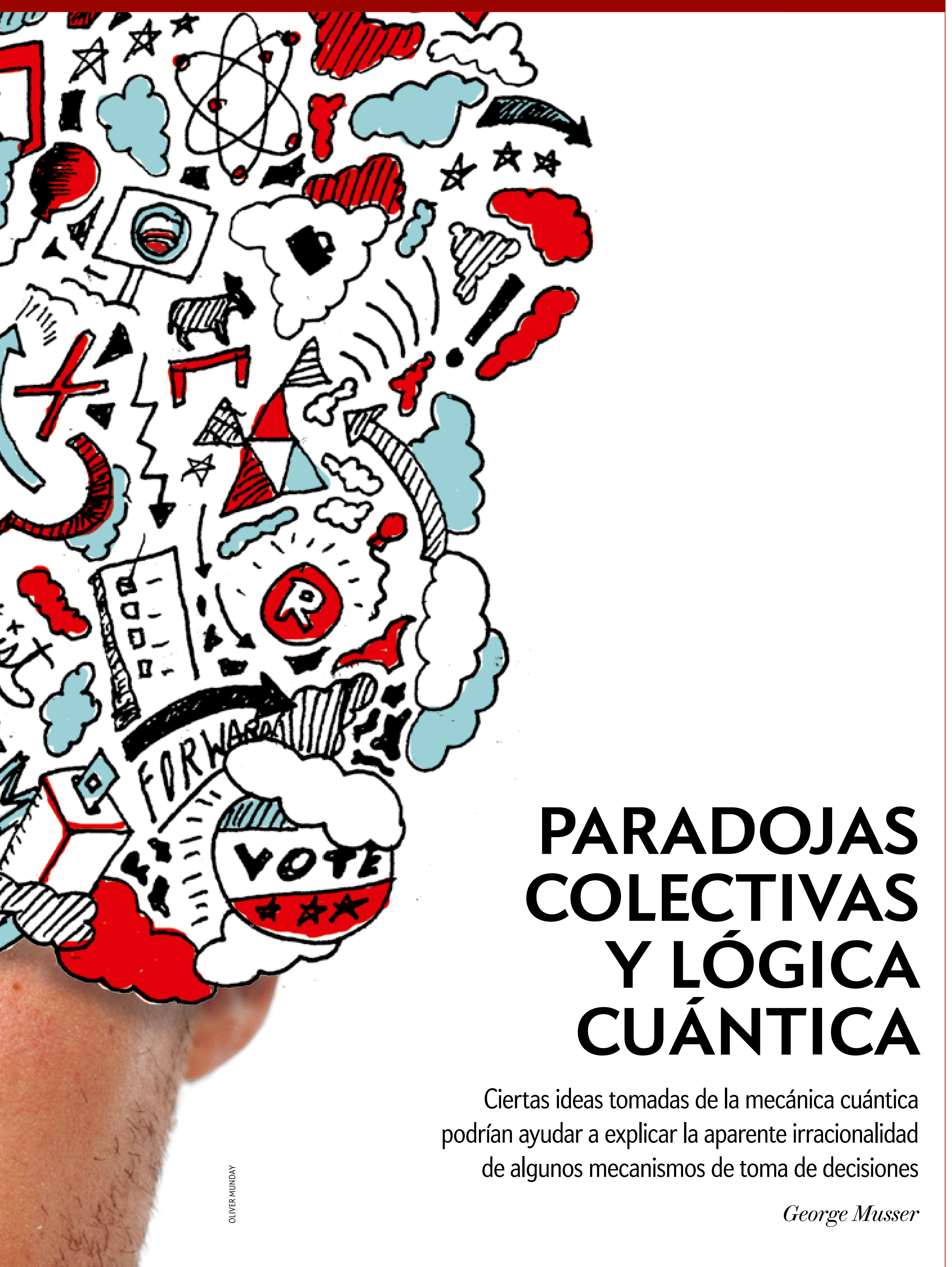
What black holes teach about strongly coupled particles. Clifford V. Johnson y Peter Steinberg en *Physics Today*, vol. 63, n.º 5, págs. 29-33, mayo de 2010. Disponible en **dx.doi.org/10.1063/1.3431328**

Quantum criticality. Subir Sachdev y Bernhard Keimer en *Physics Today*, vol. 64, n.º 2, págs. 29-35, febrero de 2011. Una versión más extensa se encuentra disponible en **arxiv.org/abs/1102.4628**

What can gauge-gravity duality teach us about condensed matter physics? Subir Sachdev en *Annual Review of Condensed Matter Physics*, vol. 3, págs. 9-33, marzo de 2012. Disponible en **arxiv.org/abs/1108.1197**

Entanglement renormalization and holography. Brian Swingle en *Physical Review D*, vol. 86, 065007, septiembre de 2012. Disponible en **arxiv.org/abs/0905.1317**


WE BUILT IT
LIBERAL
RIGHT



OLIVER MUNDAY

PARADOJAS COLECTIVAS Y LÓGICA CUÁNTICA

Ciertas ideas tomadas de la mecánica cuántica podrían ayudar a explicar la aparente irracionalidad de algunos mecanismos de toma de decisiones

George Musser

Los períodos electorales no parecen el mejor momento para loar las virtudes del pensamiento racional. Los candidatos realizan promesas imposibles de cumplir que, sin embargo, calan entre la ciudadanía. Al mismo tiempo que los eslóganes fáciles hacen su agosto, se ignoran los argumentos más meditados. Resulta decepcionante contrastar tales comportamientos con la fe en la razón y demás ideales de la Ilustración que inspiraron la creación de los sistemas democráticos.

Pero la realidad se muestra aún peor. Muy a menudo damos por sentado que podremos resolver de manera racional una cuestión si ponemos lo suficiente de nuestra parte, pero no siempre es así. Y aunque lográsemos regir nuestras vidas por medio de la razón más pura (sin votar jamás a un partido cuyo programa no hemos analizado, documentándonos a conciencia antes de adquirir un producto, sin caer en peticiones de principio, hombres de paja y demás falacias lógicas a las que nos arrastra nuestra naturaleza) aún continuaríamos llevando a cabo actos aparentemente sin sentido. Y no porque hayamos fracasado en nuestro empeño, sino porque la razón misma adolece de imperfecciones.

El siglo xx convenció a la comunidad científica de la existencia de ciertas cuestiones que siempre escaparán al entendimiento racional. En los años treinta, Kurt Gödel demostró que, incluso en el universo perfectamente racional de las matemáticas, cada paradoja resuelta da lugar a otras nuevas. La teoría económica y política se topó con limitaciones parecidas al buscar reglas racionales sobre las que basar la organización de nuestra sociedad. Y los historiadores de la ciencia comenzaron a cuestionar la creencia de que el lado correcto en cualquier disputa científica siempre puede dilucidarse mediante hechos objetivos. Las limitaciones de la razón quedaron todavía más patentes con el nacimiento de la física cuántica, que establece que ciertos procesos sencillamente ocurren sin que pueda saberse muy bien por qué.

Sin embargo, durante la última década los acontecimientos han tomado una dirección inesperada. La misma física cuántica que parecía constreñir la razón humana tal vez acabe liberándola. Puede que esta teoría resulte útil no solo para ayudarnos a comprender mejor el mundo físico, sino también a nosotros mismos. Al enriquecer las reglas del pensamiento racional, permite encontrar una salida a ciertos atolladeros a los que nos conduce la razón clásica. Si consideramos la física cuántica como un marco teórico general, tal vez el comportamiento humano no nos parezca tan irracional como pensábamos.

EN SÍNTESIS

Las ideas de la mecánica cuántica podrían ayudar a mejorar algunos mecanismos de toma de decisiones. En el dilema del prisionero, un «pacto» con partículas entrelazadas permite evitar la aparente contradicción de que la respuesta racional no sea la que revierte en el bien común.

Investigaciones recientes sugieren que algunos fenómenos cuánticos, como la superposición de estados, tal vez ayuden a modelizar el comportamiento humano mejor que la lógica clásica, incapaz de predecir la inclinación «irracional» hacia la cooperación y el altruismo.

EL PESO DE LA RAZÓN

Pocas personas han encarnado el ideal de la Ilustración mejor que el marqués de Condorcet, matemático de finales del siglo xviii. La llegada de las leyes de Newton había permitido explicar mediante unas pocas reglas sencillas todo tipo de fenómenos, desde la caída de una manzana hasta las órbitas de los planetas. Su éxito envalentonó a Condorcet, que se embarcó en la construcción de una ciencia semejante para la sociedad. Se hallaba convencido de que la razón haría del mundo un lugar mejor. Junto con otros pensadores de la Ilustración, hizo campaña a favor de un programa político progresista que abogaba por la abolición de la esclavitud, la igualdad de derechos para las mujeres y el acceso universal a un sistema de educación pública. Fue amigo de Thomas Jefferson, Benjamin Franklin y Thomas Maine, y se convirtió en uno de los primeros líderes de la Revolución francesa. En 1794, escribió: «Llegará un día en que el Sol únicamente iluminará sobre la Tierra a hombres libres que no admitirán a más señor que su razón [...] que sabrán reconocer y asfixiar, bajo el peso de la razón, los primeros gérmenes de la superstición y la tiranía, si alguna vez estas osaran reaparecer».

Pero la revolución tomó después un cariz tenebroso. Condorcet fue arrestado, murió en prisión al día siguiente y acabó enterrado en una fosa común de la que hoy no quedan registros. La Ilustración dio paso al Romanticismo. Para numerosos pensadores, los excesos de la revolución desacreditaron por completo el programa progresista.

Como colofón a la tragedia, Condorcet había llegado a poner en duda el concepto mismo de voluntad popular, clave en el pensamiento ilustrado. Demostró que los sistemas de votación democráticos conducían a paradojas, pues las decisiones de las personas pueden combinarse de manera contradictoria e irresoluble. El matemático y ensayista político Piergiorgio Odifreddi, de la Universidad de Turín, pone como ejemplo las elecciones presidenciales estadounidenses de 1976. Gerard Ford ganó la candidatura por el Partido Republicano frente a Ronald Reagan solo para perder luego las elecciones contra Jimmy Carter. Sin embargo, las encuestas indicaban que Reagan habría vencido a Carter (como en efecto ocurrió en 1980). Las inclinaciones del electorado eran intransitivas: preferir a Carter frente a Ford y a este frente a Reagan no implicaba preferir a Carter frente a Reagan. La única razón por la que Carter venció fue que las primarias se celebraron antes que las presidenciales. «El vencedor quedó determinado solo por el orden de las votaciones, no por el electorado», explica Odifreddi. En principio, los

presidentes de comisiones y asambleas pueden aprovecharse de esta dependencia del orden, o no conmutatividad, para inclinar el resultado de una votación en favor de sus intereses.

En 1950, Kenneth Arrow, por aquel entonces estudiante de doctorado en la Universidad de Columbia, demostró que solo hay una manera de evitar por completo tales paradojas: la dictadura. Cuando uno de los votantes ejerce un poder decisivo, el orden de las votaciones pasa a un segundo plano [*véase* «Preferencias colectivas», por Agustín Rayo; Investigación y Ciencia, agosto de 2010]. Entre otros, este hallazgo contribuyó a que Arrow recibiese en 1972 el premio Nobel de economía. «Resulta análogo al teorema de Gödel. Demuestra que existen limitaciones en nuestra idea general de democracia», explica Odifreddi. Puede que el propio Gödel hubiese llegado con anterioridad a una versión del teorema de Arrow. Una argumentación suya en favor de la existencia de Dios contiene ideas similares.

Las democracias suelen esquivar las paradojas de Condorcet porque los votantes pueden clasificarse de acuerdo con un espectro ideológico, lo cual aporta cierta regularidad y coherencia mutua a sus puntos de vista [*véase* «La elección más justa», por Partha S. Dasgupta y Eric Maskin; Investigación y Ciencia, junio de 2004]. Sin embargo, no deja de resultar irónico que la cultura occidental aplauda el pensamiento independiente y desideologizado cuando, justamente, esa manera de pensar agarrotaría el sistema de votación. Tal y como explica Odifreddi, en tiempos de inestabilidad política ese espectro puede enmarañarse y tornar la democracia en un sistema completamente disfuncional.

LA MECÁNICA CUÁNTICA PROPORCIONA UN MODELO DEL COMPORTAMIENTO HUMANO EN EL QUE CIERTA IRRACIONALIDAD COBRA SENTIDO

En el mismo año en que Arrow demostró su teorema, los matemáticos Merrill Flood y Melvin Dresher hallaron otra fuente de tensión entre las decisiones individuales y las colectivas: el dilema del prisionero. La policía detiene a dos ladrones, los interroga por separado y ofrece a cada uno de ellos el siguiente trato: si delata a su compañero y este guarda silencio, obtendrá la libertad más una recompensa, y su compinche será condenado a la máxima pena. Si ambos callan, saldrán libres, pero sin recompensa. Y si cada uno de ellos delata al otro, ambos serán condenados a una pena menor. El pacto induce claramente a delatar: de hecho, es lo que cada uno debería hacer si actuase de manera completamente racional y mirase solo por su propio interés. Sin embargo, eso provocará que ambos salgan perdiendo [*véase el recuadro en la página siguiente*]. El dilema del prisionero puede considerarse un modelo simplificado de las limitaciones del libre mercado, ya que contradice uno de los pilares del pensamiento económico neoclásico: que un conjunto de individuos racionales que actúen en su propio beneficio producirán el mejor resultado posible a nivel colectivo.

Formulada en 1970 por el economista Amartya Sen, de la Universidad Harvard, la *paradoja liberal* constituye un resultado similar. Del mismo modo que Arrow sembró la duda sobre la democracia o Flood y Dresher lo hicieron sobre el libre mercado, Sen hizo mella en la noción de libertad individual. El derecho más básico que un individuo debería poder ejercer es el de vetar las decisiones que le afecten solo a él mismo. El ejemplo original de Sen consideraba la censura: la decisión de leer o no un libro afecta solo a esa persona; por tanto, debería permanecer bajo su control exclusivo. La regla de las mayorías siempre ha entrado en conflicto con las libertades individuales, ya que permite que un grupo mayoritario pueda imponer su voluntad sobre una minoría. Lo que resulta más extraño es que incluso las situaciones de unanimidad puedan vulnerar libertades. En otras palabras: los derechos de una persona pueden verse amenazados por decisiones con las que, implícitamente, ella misma está de acuerdo.

En una variante menos hipotética del ejemplo de Sen, consideremos el caso de dos votantes, Rojo y Azul, quienes deberán decidir sobre los beneficiarios de un programa de ayudas sociales. Rojo preferiría que ambos recibiesen la ayuda; aunque, de no ser posible, optaría por que se la dieran a Azul, ya que él es el más necesitado de los dos. Azul, por su parte, cree que ninguno de los dos debería verse beneficiado por el programa; sin embargo, en caso de haber un solo destinatario, preferiría serlo él para así salvaguardar a Rojo de la perniciosa influencia de los subsidios. Llegados a este punto, ambos deberán conformarse con su segunda opción. Si de ellos depende, Azul acabará recibiendo una ayuda que no deseaba y esta le será denegada a Rojo, quien la habría aceptado gustoso. Todas estas paradojas sugieren que algunas de las interminables disputas de nuestra sociedad tal vez no se deban tanto a la irracionalidad o falta de coherencia de las personas, sino a los propios mecanismos de toma racional de decisiones: aun estando dirigidos a reconciliar puntos de vista diversos, pueden recrudecer el conflicto en según qué situaciones.

EL FINAL DE LA PARADOJA

Durante los años cincuenta y sesenta del siglo pasado, se exploraron distintos métodos para sortear las contradicciones que plantea el dilema del prisionero. Una posibilidad nos la proporciona el uso de estrategias condicionadas. En lugar de escoger entre delatar o no a su compinche, cada uno puede responder con una regla del tipo: «Si mi compañero guarda silencio, yo también lo haré». Si se utiliza el conjunto adecuado de enunciados condicionales, ambos pueden evitar la prisión. El aspecto clave de esta clase de maniobras reside en que ninguno de ellos gana nada si opta por otra estrategia, por lo que se trata de un cálculo puramente racional y egoísta que, sin embargo, induce a ambos a cooperar. Lo óptimo para cada individuo se convierte también en lo mejor para el grupo. Sin embargo, este esquema adolece de un serio inconveniente: los dos sujetos deberán aferrarse a sus estrategias condicionadas pase lo que pase. Se requiere algún tipo de mecanismo que proporcione a ambos la seguridad de que no van a ser traicionados en el último momento.

La mecánica cuántica nos proporciona un mecanismo de esa clase. En 1998, los físicos Jens Eisert y Martin Wilkens, por aquel entonces en la Universidad de Potsdam, y Maciej Lewenstein, en la Universidad de Hannover, propusieron emplear una pareja de partículas entrelazadas como contrato vinculante. De esta manera, y aun sin información concreta sobre qué opción tomará su compañero (lo que permitiría amañar el juego), los sospechosos pueden emplear el par de partículas para coordinar sus decisiones. En 2001, Jiangfeng Du, de la Universidad China de Ciencia y Tecnología en Hefei, y sus colaboradores pusieron en práctica esta estrategia en un laboratorio. Entrelazaron dos núcleos de hidrógeno y utilizaron pulsos de radio para simular las distintas fases del juego.

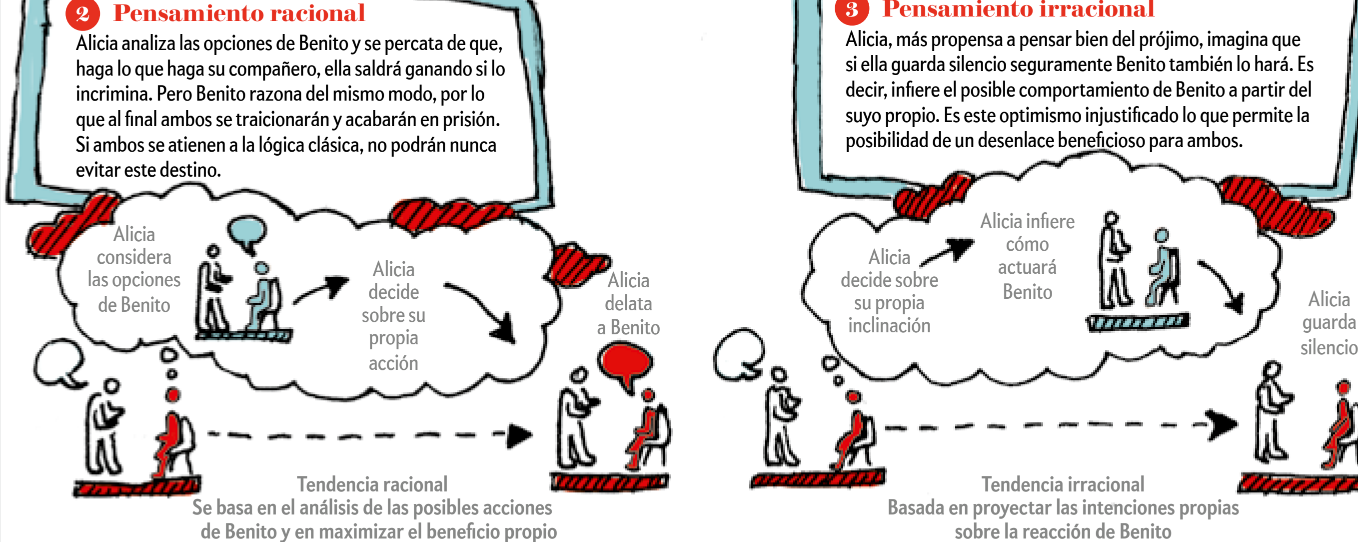
El físico matemático Gavriel Segre sugiere que un truco similar podría servir para esquivar los callejones sin salida inhe-

LÓGICA CUÁNTICA E IRRACIONALIDAD HUMANA

Cómo liberar prisioneros cuánticos

Es un hecho universalmente conocido que los humanos no nos comportamos de manera racional. Por «racional» entendemos aquella conducta que sigue los principios de la lógica clásica. Sin embargo, si ampliamos el conjunto de reglas lógicas tomando como fuente de inspiración la mecánica cuántica, algunos comportamientos aparentemente irracionales hallan una explicación. El conocido dilema del prisionero nos proporciona un buen ejemplo.





Análisis de las opciones de Benito	Acción de Alicia
Benito guardará silencio	Lo delata
Benito me delatará	Lo delata

Intención de Alicia	Comportamiento inferido para Benito
Guardaré silencio	Benito guardará silencio
Lo delataré	Benito me delatará

OLIVER MUNDAY

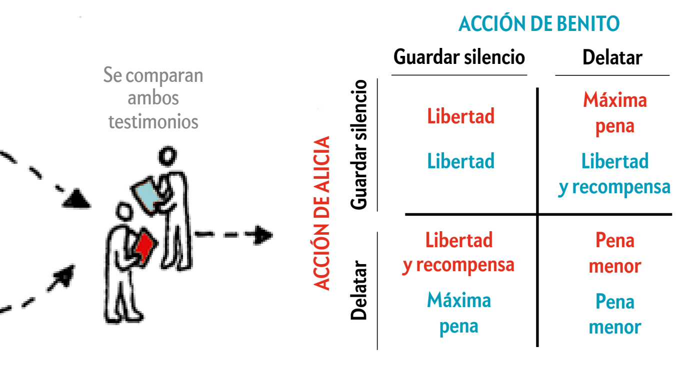
rentes a los sistemas electorales, sin necesidad de recurrir a un dictador. Su interés por el tema nació en verano de 2008, tras leer una entrevista con Odifreddi en el periódico *La Stampa*. Apoyándose en el teorema de Arrow, Odifreddi había dictaminado la obsolescencia de la democracia representativa. «Discrepaba, así que empecé a buscar respuestas a los problemas que planteaba el teorema de Arrow», cuenta Segre.

Segre argumenta que la física cuántica enriquece las posibilidades de los sistemas de votación. Al igual que el gato de Schrödinger, un ciudadano podría encontrarse en dos estados mentales superpuestos, votando «sí» y «no» a la vez. Al agregarse, las dos opciones de voto pueden potenciarse o cancelarse una a otra. Ambas podrían también entrelazarse, lo que daría lugar a una suerte de pacto ciudadano para votar de forma coordinada, al estilo del contrato vinculante descrito para el dilema del prisionero. Al contrario de lo que sucede en el caso clásico considerado por Arrow, aquí el concepto de «voluntad popular» sí puede definirse de manera coherente.

Por desgracia, la prueba de Segre resulta muy abstracta. Varios de los expertos en teoría electoral consultados para este artículo dudan sobre su corrección, por no hablar de la posibilidad de implementarla algún día en las constituciones del siglo XXI. Con todo, Artur Ekert, de la Universidad de Oxford y el Centro de Tecnología Cuántica de la Universidad de Singapur, piensa que tal vez Segre haya encontrado algo importante. La naturaleza probabilística de la mecánica cuántica quizá nos permita diseñar un sistema de votaciones libre de incongruencias sin necesidad de recurrir a un dictador. En tales casos seguiría siendo necesario un líder con cierto poder decisorio, pero su voluntad sí podría anularse en ocasiones puntuales. «Aún tendríamos un dictador, pero mucho más débil», explica Ekert.

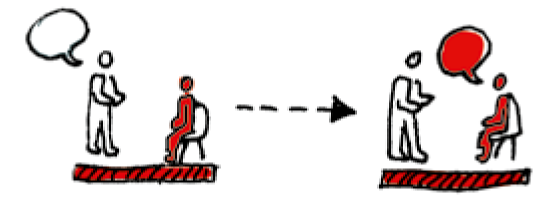
CRÍTICA DE LA RAZÓN PURA

Con todo, salvo que se permita a la gente acudir a los colegios electorales y a las comisarías con partículas entrelazadas, la física cuántica no elimina las paradojas originales ni proporcio-



4 Razonamiento cuántico

Las tendencias racionales e irracionales compiten. El policía puede influir sobre el resultado intentando convencer a cada sospechoso sobre lo que hará su compañero. Si el agente permanece callado, dos prisioneros «clásicos» deberían promediar a partir de las opciones anteriores. Sin embargo, cuando el experimento se realiza con voluntarios reales, se observa una mayor propensión a cooperar. Un modelo cuántico en el que las probabilidades se calculan a partir opciones superpuestas permite modelizar este comportamiento.



Declaraciones del interrogador	Acciones de Alicia
«Benito te delatará»	Alicia delata el 100 % de las veces
«Benito guardará silencio»	Alicia delata el 80 % de las veces
El interrogador no dice nada	**Comportamiento clásico:** Alicia traiciona a Benito el 90 % de las veces (la media entre 100 % y 80 %)
	Comportamiento cuántico: Alicia traiciona a Benito el 60 % de las veces (los diferentes motivos para delatar se cancelan en lugar de combinarse)

na un sistema práctico para la toma de decisiones. Pero la importancia de estas investigaciones reside en que tal vez proporcionen un modelo «cuántico» del comportamiento humano en el que las conductas aparentemente irracionales cobrarían sentido.

En la vida real, los individuos cooperamos mucho más a menudo de lo que lo haríamos si solo buscásemos de manera racional el beneficio propio. Cuando se realizan experimentos en los que a un grupo de voluntarios se les propone participar en el dilema del prisionero, se observa que los jugadores a veces cooperan a pesar de los alicientes que inducen a la delación. Si Alicia cree que Benito va a traicionarla, sin duda lo delatará. Y si piensa que Benito guardará silencio, lo más probable es que también lo haga; pero puede que en ciertas ocasiones se decida a cooperar. Esta última opción suele ser la que toman los individuos en torno al 20 por ciento de las veces. No representa un gran valor, pero no deja de ser un pequeño rayo de esperanza dada la naturaleza mezquina del juego.

Lo más extraño, sin embargo, es que si Alicia no está segura de cómo obrará Benito, se mostrará más propensa que antes a guardar silencio. Ninguna criatura puramente racional se comportaría de esa manera: si la probabilidad de que Benito la delate asciende al 50 por ciento, el razonamiento lógico clásico dicta que Alicia debería promediar sobre ambas posibilidades; por lo que, a partir de los porcentajes previos, debería permanecer en silencio el 10 por ciento de las ocasiones. Sin embargo, ante estas circunstancias los voluntarios cooperan el 40 por ciento de las veces.

Si empleamos cierta lógica cuántica, la «media» de 0 y 20 sí puede ser 40. En Alicia conviven dos inclinaciones superpuestas: delatar con toda seguridad a Benito si él lo hace y muy probablemente incriminarlo si él guarda silencio. Pero al sopesar ambas posibilidades, estas pueden cancelarse parcialmente entre ellas e impulsarla a guardar silencio. El psicólogo Emmanuel Pothos, de la Universidad de la Ciudad de Londres, lo explica de la siguiente manera: «Las dos inclinaciones a traicionar, si bien lógicas por separado, interfieren entre sí y rebajan la probabilidad de que la persona se decida a delatar».

En 2009, Pothos y Jerome Busemeyer, psicólogo de la Universidad de Bloomington en Indiana, propusieron un modelo cuántico teórico que reproducía las observaciones de algunos de los experimentos psicológicos. La razón por la que funciona reside en que, en la mayoría de los casos, las preferencias de las personas no resultan inamovibles. Nuestros sentimientos son ambivalentes y se encuentran condicionados por lo que piensa la gente de nuestro entorno. «Somos criaturas muy dependientes del contexto, por lo que no hay ninguna "postura bien definida" allí sentada esperando a ser medida». Las superposiciones cuánticas capturan esas sensaciones encontradas. Ello no implica que nuestros cerebros sean computadores cuánticos, como se ha llegado a especular, sino que la física cuántica tal vez resulte una metáfora útil para explicar la fluidez del pensamiento humano.

En cierto sentido, el incipiente campo de la cognición cuántica completa el círculo histórico que ha vivido la teoría. A principios del siglo xx, algunos trabajos en psicología, como los de William James, influyeron a Niels Bohr y a otros fundadores de la mecánica cuántica. Esta llegó en un momento en el que el racionalismo —que desde la Ilustración había experimentado sus vaivenes de popularidad entre los pensadores— se encontraba de capa caída: la Primera Guerra Mundial no había contribuido a crear un clima de optimismo acerca de las posibilidades de superación del ser humano. Es fácil entender que Bohr y otros físicos se sintieran atraídos por una teoría como la mecánica cuántica, que imponía límites al conocimiento. Pero la historia intelectual es cíclica. Tal vez los avances en mecánica cuántica ayuden a renovar ese optimismo.

PARA SABER MÁS

Quantum games and quantum strategies. Jens Eisert, Martin Wilkens y Maciej Lewenstein en *Physical Review Letters*, vol. 83, n.º 15, págs. 3077–3080, 11 de octubre de 1999. Disponible en **arxiv.org/abs/quant-ph/9806088**.
A quantum probability explanation for violations of «rational» decision theory. Emmanuel M. Pothos y Jerome R. Busemeyer en *Proceedings of the Royal Society B*, vol. 276, n.º 1665, págs. 2171–2178, 22 de junio, 2009.
Does quantum interference exist in Twitter? Xin Shuai et al. **arxiv.org/abs/1107.0681**.
Quantum democracy is possible. Gavriel Segre. **arxiv.org/abs/0806.3667v4**.
Quantum structure in cognition: Fundamentals and applications. Diederik Aerts et al. **arxiv.org/abs/1104.3344**.

David Tong es profesor de física teórica en la Universidad de Cambridge. Sus investigaciones se centran en la teoría cuántica de campos, la teoría de cuerdas, los solitones y la cosmología.

EL CUANTO *NO CUÁNTICO*

Los físicos sostienen a menudo que la naturaleza presenta un aspecto puntillista a las escalas más pequeñas. Pero una mirada más atenta revela un universo continuo, más analógico que digital

David Tong



NOTA:
Hace dos años, el concurso de ensayos que de manera periódica convoca el Instituto para las Cuestiones Fundacionales (FQXi) planteó a físicos y filósofos la siguiente pregunta: ¿es el universo analógico o digital? A pesar de las connotaciones de la teoría cuántica, un gran número de participantes argumentaron a favor de una realidad continua en su esencia. El ensayo presentado por David Tong, en el cual se basa este artículo, fue uno de los premiados.

EN SÍNTESIS

La mecánica cuántica parece insinuar una versión discreta del mundo. No obstante, sus ecuaciones fundamentales se escriben en términos de cantidades continuas. Las propiedades discretas solo aparecen como una propiedad emergente de dichas ecuaciones.

Otros expertos opinan que, si se escrutase con mayor detalle, esa apariencia de continuidad revelaría una estructura discreta subyacente. Pero esta idea parece contradecir al menos un aspecto fundamental de la naturaleza: la quiralidad del modelo estándar.

A finales del siglo xix, el célebre matemático alemán Leopold Kronecker pronunció la siguiente máxima: «Dios creó los enteros, el resto es obra del ser humano». Kronecker se hallaba convencido de que los números enteros cumplían una función clave en matemáticas. Hoy en día la cita adquiere un cariz distinto. Se mezcla con una creencia que, durante las últimas décadas, se ha hecho más y más popular: que la naturaleza, en su nivel más profundo, es discreta; que los ladrillos fundamentales de la materia y el espaciotiempo pueden contarse de uno en uno. Si bien esta idea se remonta a los antiguos atomistas griegos, en la era digital en la que vivimos cobra un peso adicional. Numerosos físicos han llegado a imaginar el mundo como un vasto ordenador, descrito por bits de información y en el que las leyes físicas corresponderían a un algoritmo, como la verde lluvia digital que contemplaba Neo al final de la película *Matrix*.

¿Operan de ese modo las leyes de la naturaleza? Aunque parezca ir en contra del espíritu de nuestro tiempo, somos muchos quienes pensamos que en última instancia la realidad es analógica. Desde este punto de vista, el universo constituiría un verdadero *continuum*: con independencia de cuántos aumentos empleásemos para observarlo, jamás veríamos ladrillos indivisibles. Las cantidades físicas no vendrían dadas por números enteros, sino reales, con una infinita cantidad de dígitos tras la coma decimal. Muy a pesar de los entusiastas de *Matrix*, las leyes físicas conocidas exhiben propiedades que nadie sabe cómo simular en un ordenador, no importa de cuánta memoria disponga este. Y si deseamos formular una teoría unificada de la naturaleza, entender este aspecto de las leyes físicas reviste una importancia fundamental.

UN ANTIGUO ENIGMA

El debate entre digital o analógico data de muy antiguo. Los atomistas griegos concebían una realidad discreta, pero otros filósofos de la Antigüedad, como Aristóteles, la consideraban continua. Entre los siglos xvii y xviii, la época de Isaac Newton, los filósofos naturales deliberaban sobre las teorías corpuscular y ondulatoria. En los tiempos de Kronecker, atomistas de la talla de John Dalton, James Clerck Maxwell y Ludwig Boltzmann contribuyeron a derivar las leyes de la química, la termodinámica y los gases. Pero otros continuaban sin estar convencidos.

Wilhelm Ostwald, receptor del premio Nobel de química en 1909, subrayó que las leyes de la termodinámica solo se referían a cantidades continuas, como la energía. De igual modo, la teoría de Maxwell describía los campos eléctrico y magnético como entidades continuas. Y en 1882, Max Planck, uno de los padres de la mecánica cuántica, concluía uno de sus artículos con estas palabras: «A pesar de los innumerables éxitos que la teoría atómica ha cosechado hasta ahora, antes o después deberemos abandonarla en favor de la suposición de una materia continua».

Por aquel entonces, uno de los argumentos más convincentes en defensa de una naturaleza continua se basaba en la aparente arbitrariedad de las cantidades discretas. ¿Cuántos planetas hay en el sistema solar? En la escuela aprendimos que nueve, pero en 2006 los astrónomos excluyeron a Plutón y lo relegaron a la categoría de los planetas enanos. Si ahora incorporásemos todos estos, obtendríamos trece. Por tanto, la única respuesta cabal a la pregunta de cuántos planetas hay en el sistema solar es que depende de cómo elijamos contarlos. El cinturón de Kuiper, más allá de Neptuno, incluye innumerables objetos con tamaños que abarcan desde un micrómetro hasta varios kilómetros. La única manera de fijar el número de planetas pasa por establecer una distinción arbitraria entre qué consideramos un planeta enano, una roca o un trozo de hielo.

Pero la mecánica cuántica transformó el debate para siempre. Si bien la definición de planeta tal vez sea arbitraria, no ocurre lo mismo con los átomos o las partículas fundamentales. Los números enteros que empleamos para etiquetar los elementos químicos (que, como sabemos hoy, corresponden a la cantidad de protones en el núcleo) no dependen de ningún convenio. No importa qué sorpresas nos depare la física del futuro: siempre estaré dispuesto a apostar que jamás observaremos un elemento con $\sqrt{500}$ protones que se sitúe entre el titanio y el vanadio. Los números enteros han venido a la física para quedarse.

Otro ejemplo lo hallamos en espectroscopía, el análisis de la luz que emite y absorbe la materia. Un átomo de cierta especie solo radia luz de determinados colores, lo cual sirve a modo de huella dactilar para identificar cada elemento. Pero, muy al contrario de lo que sucede con las huellas dactilares de los humanos, las improntas de los elementos atómicos obedecen reglas matemáticas muy estrictas, las cuales se formulan en términos de números enteros. Los primeros intentos de entender la teoría cuántica, en particular los realizados por Niels Bohr, otorgaron a los enteros una posición privilegiada.

ENTEROS EMERGENTES

Pero Bohr no pronunció la última palabra. En 1925, Erwin Schrödinger formuló una versión de la teoría basada en ondas. La ecuación que describe la propagación de esas ondas solo posee cantidades continuas, ningún entero. A pesar de ello, cuando resolvemos la ecuación de Schrödinger para un sistema concreto, la magia de las matemáticas hace acto de presencia. En el átomo de hidrógeno, por ejemplo, el electrón orbita alrededor del protón a distancias muy determinadas. Esos orbitales fijos se traducen después en el espectro del átomo de hidrógeno, que de esta manera se asemeja al tubo de un órgano, el cual solo emite una serie discreta de tonos a pesar de que el movimiento del aire es continuo. Al menos en lo que se refiere a los átomos, la lección no deja lugar a dudas: Dios no creó los números enteros, sino los reales. El resto es obra de la ecuación de Schrödinger.

Al contrario de lo que pensaba Bohr, los enteros no constituyen un requisito de la teoría, sino un resultado: nos brindan un buen ejemplo de lo que los físicos llamamos cantidades emergentes. Así visto, el término «mecánica cuántica» no parece muy apropiado: en lo más profundo, la teoría no es cuántica. En los sistemas como el átomo de hidrógeno, los procesos descritos por la teoría forjan cantidades discretas a partir de una base continua.

Pero, más sorprendente aún si cabe, la existencia de átomos o partículas no constituye ningún requisito esencial de nuestras teorías. Los físicos explican de manera rutinaria que los ladrillos fundamentales de la materia se corresponden con ciertas partículas elementales, como electrones o quarks. Eso no es cierto. Los componentes básicos de nuestras teorías no son las partículas, sino los campos: entidades continuas semejantes a un fluido que impregnan todo el espacio. Quizá los campos eléc-

KENN BROWN, MONDOLITHIC STUDIOS (*página anterior*)

tricos y magnéticos nos resulten más familiares, pero existe también el campo del electrón, el de los quarks, el de la partícula de Higgs y muchos otros. Los objetos que denominamos partículas «fundamentales» no son tales, sino meras excitaciones, o rugosidades, de campos continuos.

Un escéptico podría argumentar que las leyes de la física sí contienen cantidades enteras. A fin de cuentas, describen tres especies de neutrinos, seis tipos de quarks (cada uno en tres variedades, denominadas «colores») y así sucesivamente. Enteros, enteros por todas partes. Estos ejemplos cuentan el número de especies de partículas que existen en el modelo estándar, una cantidad célebre por la dificultad que entraña definirla con precisión matemática cuando todas las partículas interaccionan entre sí. Las partículas pueden mutar: cuando un neutrón se desintegra, emite un protón, un electrón y un antineutrino. ¿Debemos contarlo como una partícula, como tres o como cuatro? Las afirmaciones del estilo de que existen tres tipos de neutrinos o seis clases de quarks no constituyen más que un artificio derivado de desechar las interacciones entre partículas.

He aquí otro ejemplo de un entero en las leyes de la física: el número de dimensiones espaciales que observamos. Tres... ¿o no? Benoît Mandelbrot nos enseñó que el número de dimensiones no tiene por qué venir dado por un entero. La línea que demarca la costa marítima de Gran Bretaña, por ejemplo, posee una dimensión que asciende aproximadamente a 1,3. Y en algunas de las teorías propuestas para unificar las interacciones, como la teoría de cuerdas, el número de dimensiones del espacio resulta ambiguo: las dimensiones pueden emerger o disolverse.

Me atrevería a afirmar que en todas las leyes de la física solo hay un número entero: el que define la dimensión temporal. Solo con una y exactamente una dimensión temporal, las leyes de la física parecen conservar su consistencia interna.

IDEAS INDISCRETAS

A pesar de que las teorías actuales se basan en una realidad continua, gran parte de mis colegas de profesión se muestran convencidos de que bajo esa continuidad se esconde una realidad discreta. Argumentan a su favor con ejemplos en los que lo continuo emerge a partir de lo discreto. A la escala macroscópica de nuestra experiencia cotidiana, el agua en un vaso nos parece suave y continua. Solo al explorarla muy de cerca descubrimos sus componentes atómicos. ¿Puede que un mecanismo similar gobierne las leyes fundamentales de la física? Tal vez, si los escrutásemos con mayor detalle, los suaves campos cuánticos del modelo estándar o incluso el espaciotiempo mismo mostrarían una estructura discreta.

Ignoramos la respuesta a semejante pregunta. Pero, tras más de cuarenta años simulando el modelo estándar en computadoras, contamos con algunas pistas al respecto. Para llevar a cabo dichas simulaciones debemos partir de las ecuaciones de la teoría, las cuales se expresan en términos de cantidades continuas, y hallar una formulación discreta que resulte compatible con los bits que manejan los ordenadores. Sin embargo, a pesar de las décadas de esfuerzo que se han invertido en esta tarea, nadie hasta ahora lo ha conseguido. Hoy por hoy —y aunque rara vez se menciona— este constituye uno de los problemas abiertos más importantes de la física teórica.

Existe una versión discreta de la teoría cuántica de campos, llamada teoría de campos en el retículo (*lattice*). En ella, el espaciotiempo se sustituye por una colección discreta de puntos. Los ordenadores evalúan varias cantidades en esos puntos para aproximar así los campos continuos. Pero la técnica adolece de limitaciones. Las dificultades surgen a la hora de incluir electrones, quarks y otras partículas de materia llamadas fermiones. Por extraño que parezca, si rotamos un electrón 360 grados, no «veremos» el mismo objeto; para recuperar su forma original, un electrón debe girarse 720 grados. Los fermiones se resisten a ser formulados en un retículo. En los años ochenta, Holger Nielsen, del Instituto Niels Bohr de Copenhague, y Masao Ninomiya, ahora en el Instituto Okayama de Física Cuántica, en Japón, demostraron un célebre teorema que establecía la imposibilidad de hallar una formulación discreta del fermión más simple.

Pero la conclusión de un teorema solo es válida en tanto en cuanto lo sean también sus hipótesis. En los años noventa, varios físicos teóricos, muy especialmente David Kaplan, ahora en la Universidad de Washington, y Herbert Neuberguer, de la Universidad Rutgers, propusieron varios métodos para formular fermiones en un retículo. En la actualidad conocemos una gran variedad de teorías cuánticas de campos, cada una de las cuales posee fermiones de distintos tipos. Y sabemos cómo formular la gran mayoría de ellas en el retículo. Menos una: por desgracia, el único tipo de teoría cuántica de campos que no sabemos tratar de manera discreta incluye al modelo estándar. Podemos vérnoslas con todo tipo de fermiones hipotéticos, pero no con aquellos que existen en la naturaleza.

Los fermiones del modelo estándar exhiben una propiedad muy particular: solo los que rotan en dirección contraria a las agujas del reloj experimentan la interacción débil, pero no así los que giran en dirección horaria. Decimos por ello que la teoría es quiral. Las teorías quirales resultan delicadas en extremo. Ciertos efectos sutiles, llamados anomalías, amenazan con arrebatar a la teoría su consistencia matemática interna. Hoy por hoy ignoramos cómo simular esta clase de teorías en un ordenador.

Pero la quiralidad no aparece como un fallo del modelo estándar, el cual tal vez podría desaparecer con una formulación más profunda. Se trata de un aspecto fundamental de la teoría. A primera vista, el modelo estándar, basado en tres tipos de interacciones, parece un constructo arbitrario. Solo cuando reparamos en los fermiones quirales muestra toda su belleza. Se trata de un puzzle perfecto en el que las tres piezas que lo componen se ensamblan de la única manera posible. Y esas piezas encajan gracias a la naturaleza quiral de los fermiones.

No sabemos qué pensar acerca de nuestra ineptitud para simular el modelo estándar en una computadora. En general, el hecho de no saber resolver un problema no aporta demasiadas pistas. Tal vez solo se trate de una cuestión compleja cuya solución se encuentra a la espera de que demos con la técnica adecuada. Pero otros aspectos apuntan a algo más profundo. Los obstáculos que nos lo impiden guardan estrechas relaciones con la topología y la geometría. Quizá nuestras dificultades a la hora de simular fermiones quirales en un ordenador nos estén anunciando algo importante: que las leyes más profundas de la física no son discretas. Que no vivimos en una simulación informática.

PARA SABER MÁS

Quantum field theory in a nutshell. Segunda edición. A. Zee. Princeton University Press, 2012.
Chiral symmetry and lattice fermions. David B. Kaplan. arxiv.org/abs/0912.2560
Helicity, chirality, mass, and the Higgs. Flip Tanedo. **www.quantumdiaries.org/2011/06/19/helicity-chirality-mass-and-the-higgs**
Los ensayos galardonados en la convocatoria del Instituto para las Cuestiones Fundacionales (FQXi) se encuentran disponibles en **www.fqxi.org/community/essay/winners/2011.1**

por León Olivé



León Olivé es investigador del Instituto de Investigaciones Filosóficas de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Racionalidad en ciencia y tecnología

Las prácticas científicas y tecnológicas no constituyen la única manera racional de conocer y de intervenir en el mundo

El concepto de «racionalidad» suele aplicarse a una gran variedad de entidades y procesos. Puede predicarse racionalidad, o irracionalidad, de las personas, de sus creencias, de sus acciones, de sus decisiones y elecciones. Es posible hacer estos juicios tanto sobre individuos como sobre grupos de personas, como las comunidades científicas.

La reflexión sobre la racionalidad es tan antigua como la filosofía occidental. Para muchos filósofos la racionalidad se aplica sobre todo a las metodologías que deben seguirse cuando los humanos toman decisiones o hacen elecciones (cómo y por qué actuar de una cierta manera en circunstancias específicas, qué creer o no creer, etcétera). En numerosos casos se reduce el problema de la racionalidad al análisis de la elección de medios adecuados para obtener fines determinados; nos referimos a la racionalidad instrumental. Pero otros filósofos han considerado que también es posible hacer elecciones racionales o irracionales de fines y de metas, e incluso de normas y de valores. Para otros más, la racionalidad se refiere al ejercicio de una capacidad básica, la razón, la cual permite tomar decisiones y realizar una serie de acciones necesarias para habérselas con el entorno, para aprovecharlo en beneficio de quien realiza las acciones, para su supervivencia y bienestar.

La racionalidad es compleja y está compuesta de otras capacidades más básicas, entre ellas: tener representaciones del mundo; tener creencias y aceptarlas o rechazarlas; proponerse fines y tratar de lograrlos; elegir entre cursos de acción posibles; aprender y usar un lenguaje proposicional; expresar creencias por medio de proposiciones; hacer inferencias (al menos deductivas, inductivas y analógicas) y evaluar si son correctas; dialogar; dar y recibir razones; construir modelos y teorías que sirven como guías para la acción y para la intervención en el mundo; elegir entre modelos y teorías; evaluar creencias y cursos de acción posibles; justificar creencias y cursos de acción elegidos; evaluar los fines y, en su caso, justificarlos o cambiarlos; evaluar los intereses y valores propios, justificarlos y, en ocasiones, modificarlos o cambiarlos.

Tradicionalmente se ha hecho una distinción entre la «razón teórica» y la «razón práctica», y, por consiguiente, entre una racionalidad teórica (o epistémica, porque se refiere a las creencias y al conocimiento) y una práctica (que se refiere a la acción). Sin embargo, aunque esta distinción puede resultar útil para fines discursivos, en la realidad los dos ámbitos están íntimamente ligados. Es imposible comportarse racionalmente si al hacer elecciones de creencias, de teorías o de modelos (como suele ocurrir en la ciencia), no se realizan al mismo tiempo ciertas acciones y se toman decisiones que tradicionalmente se han concebido como parte de la racionalidad práctica. Y viceversa: decidir cómo actuar implica muchas veces optar por determinadas creencias. No existen, pues, una razón teórica y otra razón práctica que sean realmente diferentes.

En la filosofía de la ciencia y de la tecnología ha interesado mucho el análisis de los procesos que seguimos para elegir teorías o modelos, así como formas de actuar (cuando decidimos realizar ciertas observaciones o experimentos, en el caso de la ciencia, o cuando decidimos cómo intervenir en el mundo, en el caso de la tecnología), y si esas decisiones son racionales o irracionales.

Sobre ese problema se han presentado básicamente dos posiciones. La primera consiste en establecer a priori (sin indagar sobre la forma en que se toman esas decisiones y se hacen esas elecciones en las prácticas científicas) una serie de criterios que deben satisfacerse para que la elección o decisión en cuestión se considere racional. El problema de esta estrategia





estriba en que muchas veces los criterios propuestos se hallan demasiado alejados de las prácticas científicas o tecnológicas reales. Y como estas no satisfacen los criterios, acaban siendo consideradas no racionales. La otra estrategia se basa en no presuponer criterios a priori, sino en intentar formularlos a partir de la observación y el análisis cuidadoso de las prácticas científicas y tecnológicas, y en llamar, consecuentemente, «racionales» a esas formas de elección y de decisión. Se da entonces por sentado que las formas de proceder en ciencia y tecnología constituyen paradigmas de racionalidad, en el sentido de ejemplos de cómo se debe actuar.

¿Es racional esa manera de comprender la racionalidad misma? Podemos dar una respuesta afirmativa al hacer un recuento histórico de las prácticas científicas y tecnológicas, y constatar que las más de las veces han logrado sus propósitos y constituyen, por tanto, formas exitosas de conocer el mundo y de intervenir en él. Si bien, como veremos, contra lo que sostienen algunas corrientes filosóficas, no representan la única manera racional de conocer y de intervenir en el mundo.

Otro tema que se ha discutido ampliamente en la filosofía de la ciencia es el de la racionalidad del proceso de cambio y desarrollo científico. Cuando se acepta una nueva teoría científica y se abandona otra vieja, ¿existen formas racionales de realizar tal sustitución? ¿Todo el proceso de sustituciones, el desarrollo científico, es racional? ¿Conduce este al progreso? ¿En qué sentido?

Cuando se abandona una teoría antigua y se adopta una nueva se produce un cambio en las creencias de la comunidad científica. Estos cambios suelen ir acompañados de modificaciones en las metas que busca esa comunidad. Normalmente, los cambios de creencias y de fines se hacen para obtener mayor coherencia o realizabilidad de las metas (dos condiciones de racionalidad de la ciencia); pueden ser progresivos en el sentido de un contexto específico (ayudan a la realización de las metas establecidas en ese contexto) o en un sentido más general.

Lo que hace racional el proceso de desarrollo científico es que se remueven incoherencias y se abandonan fines que se han encontrado irrealizables, y en su lugar se proponen visiones coherentes y objetivos que se cree con buenas razones que pueden alcanzarse. Cuando los científicos hacen esas elecciones, se comportan racionalmente, y gracias a eso la ciencia progresa. Es cierto que el progreso se evalúa a partir de los fines que se han propuesto y se han logrado, pero muchos filósofos han argumentado que no existen fines últimos e inmutables con respecto a los cuales pudiera juzgarse el progreso de la ciencia, sino que el progreso consiste en el logro de los fines propuestos en cada época y por cada práctica científica.

Dijimos antes que las prácticas científicas y tecnológicas no constituyen la única manera racional de conocer y de intervenir en el mundo. En efecto, para concluir podemos mencionar dos tesis sobre la racionalidad que han sido ampliamente aceptadas a lo largo de la filosofía occidental, pero que en décadas recientes han recibido numerosas críticas. La primera sostiene que la razón constituye uno de los rasgos distintivos de nuestra especie frente a otros animales, es decir, la racionalidad sería exclusiva de los humanos. La segunda, estrechamente relacionada con la primera, defiende que existe un conjunto de criterios absolutos que permite evaluar si las elecciones de creencias, de formas de actuar, así como de medios y de fines, son racionales, sea cual sea el contexto de la elección. Ello equivale a sostener que existe un conjunto de principios universales y absolutos que orientan las elecciones humanas de creencias y acciones.

La concepción pluralista de la racionalidad da cuenta del desarrollo científico mejor que otros modelos

En décadas recientes esas tesis han sido criticadas porque no encajan con los hallazgos de las ciencias naturales y sociales, que han ofrecido motivos de peso para considerar que la razón humana resulta del proceso evolutivo (evolución de las especies) y que, por tanto, otros animales poseen capacidades análogas a las que englobamos bajo el término «razón», si bien menos desarrolladas que en los humanos. La razón sería una capacidad de muchas especies que cuentan con sistemas cognitivos que les permiten hacer discriminaciones, tomar decisiones y actuar de manera que aprovechan su entorno en beneficio propio o del grupo. La razón no constituye, pues, una capacidad privativa de los humanos que la distinga radicalmente de otros animales.

Asimismo, las ciencias sociales han mostrado que los humanos ejercitamos nuestra razón en contextos y entornos que han variado a lo largo de la historia y según el medio geográfico, ambiental y social. Por tanto, no existe un núcleo de principios comunes a la racionalidad tal y como la ha ejercido nuestra especie en el transcurso de toda su historia y como la puede ejercer en todas partes.

Esas visiones caracterizan a la *concepción naturalizada y situada de la razón y de la racionalidad*, de las cuales se deriva la *concepción pluralista de la racionalidad*. Según esta, no hay una única racionalidad, sino una pluralidad de racionalidades. Lo cual no equivale a defender un relativismo extremo, pues según el contexto y los problemas que se pretende resolver, es posible calificar como racional o irracional una decisión, una elección o una acción, de acuerdo con criterios no arbitrarios, legítimos y localmente pertinentes.

La ciencia misma, en su desarrollo histórico, ha respondido a diferentes conjuntos de criterios para elegir teorías o modelos, y para decidir cómo actuar, de manera que la concepción pluralista de la racionalidad da cuenta, mejor que otros modelos monistas, del desarrollo científico y del papel que la racionalidad ha desempeñado en la ciencia. Esta fue una de las principales contribuciones de Thomas Kuhn, especialmente en su influyente *Estructura de las revoluciones científicas*, que el año pasado cumplió medio siglo tras su publicación.

PARA SABER MÁS

Rationality. Nicholas Rescher. Oxford University Press, Oxford, 1988.

La ciencia: Estructura y desarrollo. Dirigido por Ulises Moulines, volumen 4 de la Enciclopedia Iberoamericana de Filosofía. CSIC-Ed. Trotta, Madrid, 1993.

Racionalidad epistémica. Dirigido por León Olivé, volumen 9 de la Enciclopedia Iberoamericana de Filosofía. CSIC-Ed. Trotta, Madrid, 1995.

Ciencia y acción. Una filosofía práctica de la ciencia. Alfredo Marcos. Fondo de Cultura Económica, México, 2010.

Racionalidad en ciencia y tecnología. Nuevas perspectivas iberoamericanas. Dirigido por Ana Rosa Pérez Ransanz y Ambrosio Velasco. UNAM, México, 2011.

por Alfredo Rodríguez Muñoz

Alfredo Rodríguez Muñoz es profesor del departamento de psicología social en la Universidad Complutense de Madrid.



El lado oscuro de las nuevas tecnologías

Cada vez más conectados, pero también más dependientes, aislados socialmente, dispersos e hiperactivados

El uso de las nuevas tecnologías de la información y de la comunicación (NTIC) ha crecido de forma exponencial en los últimos años. Según un estudio realizado en diciembre de 2012 por la consultora ComScore, en España seis de cada diez usuarios de teléfono móvil poseen un dispositivo inteligente (*smartphone*). Respecto a la utilización de la red social Facebook, en octubre de 2012 contaba con más de un billón de usuarios. Presentes en todos los ámbitos de nuestra vida, las NTIC han modificado la forma que tenemos de trabajar, relacionarnos y entretenernos.

En términos generales, podríamos afirmar que las nuevas tecnologías han mejorado nuestra calidad de vida. Sin embargo, no podemos obviar que su irrupción en nuestro quehacer diario va acompañada de problemáticas diversas. Las NTIC pueden generar adicción psicológica. Si bien la comunidad científica debate en la actualidad si esta dependencia debe o no considerarse un trastorno clínico, lo que resulta evidente es que presenta una sintomatología similar a la de otras conductas adictivas: uso excesivo, síndrome de abstinencia (sentimientos de ansiedad o irritabilidad ante la imposibilidad de utilizar las NTIC), tolerancia (necesidad creciente de aumentar el tiempo de utilización de las NTIC para sentirse satisfecho) y consecuencias negativas en la vida de la persona (aislamiento social, incumplimiento de las responsabilidades personales, etcétera). Un reciente estudio realizado entre estudiantes de la Universidad Stanford encontró que el 44 por ciento se consideraba adicto al teléfono inteligente.

Además de los síntomas clínicos, se manifiestan ciertos hábitos, en apariencia inofensivos (comprobación sistemática del móvil), que pueden constituir la antesala de una futura adicción. Se trata de señales de alarma que deberían tenerse en cuenta. Tal y como señalan Enrique Echeburúa y Paz de Corral, psicólogos clínicos de la Universidad del País Vasco, un claro indicador de una adicción potencial aparece cuando las NTIC se convierten en un fin y no en un medio.

Por otra parte, los avances técnicos han desdibujado los límites tradicionales entre el ámbito laboral y el personal, cambiando el significado de estar fuera del trabajo. Se nos exige una conectividad permanente, las 24 horas del día. Ello nos permite estar constantemente conectados con amigos, familia y trabajo; sin embargo, también conlleva una hiperactivación fisiológica y psicológica, que puede resultar perjudicial para la salud. Ya empiezan a aparecer estudios que lo demuestran. El equipo que dirige Arnold B. Bakker, de la Universidad Erasmus de Rótterdam, ha mostrado en fecha reciente que el uso de teléfonos inteligentes interfiere directamente con las actividades de ocio y descanso laboral, y se asocia con mayores niveles de agotamiento mental. En la misma línea, Leslie Perlow, de la Universidad Harvard, encontró que la utilización de estos dispositivos afecta a la cantidad y calidad del sueño.



En el ámbito interpersonal, también las relaciones sociales en público se han visto claramente afectadas por la aparición de las NTIC. Seguramente le resulte familiar la siguiente escena: un grupo de amigos se encuentran reunidos pero no hablan entre sí, todos están conectados mediante sus dispositivos móviles con otras personas que no se hallan físicamente en el lugar. Para describir esta nueva forma de aislamiento social en público, Kenneth J. Gergen, de la Universidad Swarthmore, ha acuñado el término «presencia ausente». Lo que hasta hace unos años parecía raro o perturbador se ha convertido en algo tan habitual que nos hemos acostumbrado rápidamente a ello.

Según Sherry Turkle, del Instituto Tecnológico de Massachusetts, estas tecnologías tienen una enorme fuerza psicológica debido a que nos ofrecen la sensación de no estar nunca solos. Cubren una de nuestras necesidades básicas: la de establecer y mantener vínculos y lazos de pertenencia con otros, desarrollar relaciones de afiliación. Sin embargo, en la actualidad muchos han aprendido a estar juntos en solitario, permanentemente conectados entre sí pero ignorando al que tienen al lado. Turkle plantea la necesidad de crear momentos y espacios libres de tecnología, para mitigar sus posibles efectos negativos, idea que comparten numerosos expertos en salud que ya aconsejan desconectar tecnológicamente de vez en cuando.

La transformación tecnológica de la sociedad está cambiando nuestro comportamiento, pero ¿está modificando también nuestra identidad? ¿En qué sentido? Albert Einstein se mostraba bastante pesimista al respecto. Se le atribuye la frase «Temo el día en que la tecnología sobrepase nuestra humanidad, el mundo solo tendrá entonces una generación de idiotas». Esperemos que no sea aún demasiado tarde.

por Pere Castells

Pere Castells, experto en ciencia y cocina, es coordinador del proyecto UB-Bullipedia.



Entre planta y edulcorante

Tras superar una larga carrera de obstáculos legales, la stevia se usa cada vez más en sustitución de la sacarina y el aspartame

La stevia (o estevia) es una planta de la familia de las Asteráceas que, en estado salvaje, se encuentra todavía en algunas zonas de Sudamérica, sobre todo en Paraguay. Debe su nombre científico, *Stevia rebaudiana* Bertoni, a Moisés Bertoni, el naturalista que la describió a finales del siglo XIX, y Ovidio Rebaudi, el químico que a principios del siglo XX llevó a cabo su análisis.

Desde hace siglos, los guaraníes vienen usándola a modo de edulcorante para mates y otras infusiones. Comenzó a apreciarse en otras latitudes en los años sesenta del siglo XX, cuando, justamente la hija de Bertoni y su marido, consiguieron cultivarla. Se produjo, además, un hecho determinante: fue introducida en Japón (uno de los principales consumidores actuales) por el botánico japonés Tetsuya Sumida y, posteriormente, pasó a China (que ya se ha convertido en el mayor productor mundial).

Ha habido cierta confusión con el término «stevia», dado que la denominación de la planta se ha extendido a los componentes responsables del dulzor de la misma. Hasta la fecha se han aislado diez de estos compuestos: steviosida, rebaudiosidas A, B, C, D, E y F, dulcosida A, rubusosida y steviolbiosida. Todos ellos son dulces por tratarse de glucósidos diterpénicos con grupo steviol. En la actualidad se comercializan los extractos de stevia que contienen un mínimo del 95 por ciento en estos glicósidos. De todos, el más potente es la rebaudiosida A (Reb-A): es entre 250 y 300 veces más dulce que el azúcar refinado y aporta solo unas 0,2 calorías por gramo. Todos los extractos se etiquetan con el nombre de stevia.

El camino para la aprobación de su uso por parte de las agencias de seguridad alimentaria ha sido largo y complejo. En Japón se aprobó enseguida, ya en 1970, como edulcorante no calórico. En EE.UU., Europa y otros países, en cambio, el proceso ha sido mucho más complicado.

En 1991, la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos estadounidense (FDA) no autorizó el uso de la stevia como infusión; en 1992 rechazó su calificación GRAS (*Generally recognized as safe*, es decir, producto saludable) y en 1995 la volvió a rechazar como suplemento dietético; y en 1998 llegó al extremo de prohibir libros de divulgación y recetas de una empresa distribuidora de stevia en Texas. Por fin, en 2008, la FDA concluyó que no tenía objeciones en contra de la Reb-A con pureza mínima del 95 por ciento, otorgándole el estatus GRAS como edulcorante de uso general y no solo como suplemento alimenticio.

Pero todavía hoy la FDA no ha autorizado el uso de la hoja entera de *Stevia* o extractos crudos debido a que no se ha demostrado su seguridad y a que persisten ciertas dudas sobre sus posibles efectos en el nivel de azúcar en sangre y los sistemas reproductor, cardiovascular y renal.

En Europa, la Autoridad Europea de Seguridad de los Alimentos (EFSA) tampoco ha puesto las cosas fáciles. En 1999, la Comisión Europea denegó la autorización para usar la planta y las hojas secas de *Stevia* como alimento o ingrediente por falta de pruebas que demostraran su seguridad alimentaria. En agosto de 2009, Francia se adelantó a la EFSA: autorizó la Reb-A como aditivo en alimentos y bebidas.

Finalmente, en noviembre 2011 la UE autorizaba el edulcorante de stevia en una serie de categorías de alimentos que incluyen productos lácteos, frutas, helados, alcohol, aceite, cerveza y dulces, entre otros. Y en diciembre 2011 se aprobó a nivel europeo como un aditivo alimentario (E-960). En muy pocos casos su dosis de uso supera el 1 por ciento. Por encima de 120 ºC puede empezar a descomponerse y a perder eficacia, sobre todo en condiciones ácidas.

Ya aprobados en casi todo el mundo los compuestos edulcorantes de la stevia, se han vuelto a reivindicar los beneficios de la planta. En este sentido, Roberto Lemus-Mondaca, de la Universidad de La Serena y la Universidad de Santiago de Chile, y sus colaboradores publicaron en 2012 un artículo en *Food Chemistry* sobre la planta *Stevia rebaudiana* Bertoni como fuente edulcorante de alta potencia natural.

Su aplicación en los restaurantes y los hogares viene a sustituir a los edulcorantes intensivos clásicos como la sacarina, el aspartame, acesulfame-K, sucralosa y otros. Presenta, sin embargo, un inconveniente: su sabor a regaliz. Este se ha intentado minimizar mediante el aumento de la pureza de los compuestos edulcorantes, pero, aun así, se percibe levemente. También se está optando por mezclarlo con otros componentes (azúcar, fructosa, eritritol, sucralosa, etcétera).

Su fuerte entrada en el mercado y la gran aceptación del consumidor debido a su procedencia natural vaticinan un futuro espléndido para la stevia.



***Stevia rebaudiana* Bertoni**

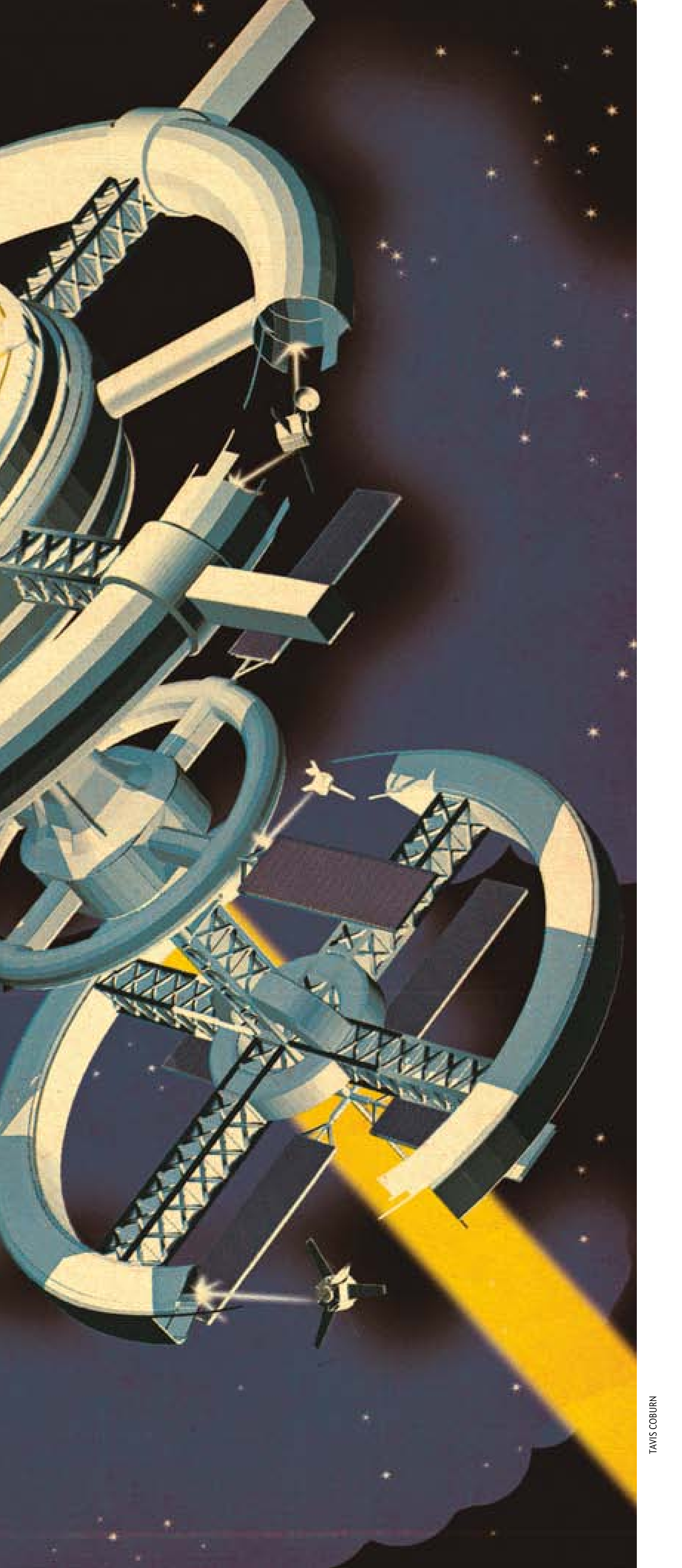


EVOLUCIÓN

LA HUMANIDAD EN EL ESPACIO

¿Cómo viajarán las generaciones futuras desde nuestro hogar terrestre hasta los planetas, y aún más lejos? ¿Qué consecuencias tendrá para nuestra especie?

Cameron M. Smith



TAVIS COBURN

El cese definitivo de los vuelos del transbordador espacial *Atlantis* en 2011 no significa, como algunos se temían, el final de los viajes espaciales tripulados. Al igual que los primeros mamíferos medraron gracias a la extinción de los dinosaurios, la retirada del transbordador espacial le abre a la exploración espacial posibilidades inéditas y de una magnitud mucho mayor. Siguiendo a empresas privadas llenas de ambición, vamos entrando en las etapas iniciales de nuestra emigración fuera de la Tierra, de la adaptación de nuestra especie a mundos nuevos. Marte es el objetivo expreso de Elon Musk, que hizo su fortuna con Paypal; los exploradores de los Polos Tom y Tina Sjögren están haciendo planes para un viaje privado a Marte; y el proyecto europeo Mars One, privado también, tiene previsto establecer allí una colonia humana en 2023. La colonización espacial está empezando en estos mismos momentos.

Pero la tecnología no es suficiente. Para que la colonización espacial tenga éxito a largo plazo, debemos prestar tanta atención a la biología y a la cultura como a la ingeniería. No es cosa solo de cohetes y robots; hay que tener en cuenta cuerpos, personas, familias, comunidades y culturas. Debemos empezar a construir una antropología de la colonización espacial para abordar el mundo confuso, enredado, dinámico, a veces irritante, de la adaptación biocultural humana. Debemos planear este nuevo proyecto teniendo en cuenta el hecho más inequívoco de todos los que atañen a los seres vivos: que a lo largo del tiempo la evolución les hace cambiar.

Tres son las ideas sobre la colonización espacial con más peso. La primera es habitar Marte. Las colonias marcianas, por las que tanto ha abogado el irascible ingeniero espacial y presidente de la Mars Society Robert Zubrin, serían autosuficientes: utilizarían recursos locales para producir agua y oxígeno, y fabricar materiales de construcción. Vienen luego las colonias flotantes, enormes hábitats construidos con metales de la Luna o de los asteroides. Las popularizó el físico Gerard K. O'Neill en la década de 1970. Albergarían a miles de personas, girarían para producir una gravedad semejante a la terrestre (como ya se imaginaba, de un modo muy bello, en la película *2001: Una odisea del espacio* de 1968), y orbitarían alrededor de la Tierra o permanecerían en alguno de los denominados puntos de Lagrange, donde las atracciones gravitacionales del Sol y la Tierra se equilibran de modo que el objeto conserva a lo largo de su movimiento orbital la misma posición con respecto a los dos astros. Finalmente, podríamos tomar en consideración el arca espacial, una nave gigantesca que llevaría muy lejos de la Tierra a miles de colonos espaciales en un viaje sin retorno que duraría muchas generaciones. He estado colaborando con la fundación sin ánimo de lucro Icarus Interstellar para diseñar una misión de este tipo.

Cada uno de esos enfoques tiene sus ventajas, y pienso que todos son tecnológicamente inevitables. Pero nunca debe confundirse la colonización espacial con la conquista del espacio. No cabe ni imaginar cuán extenso es el universo más allá de nuestro mundo. Será lo que ha sido siempre. Cuando la humanidad comience a vivir en el espacio seremos nosotros quienes cambiaremos.

LOS PIONEROS

¿Quiénes serán los colonos del espacio? Debemos olvidarnos de las viejas selecciones de tripulación, de esas pruebas infernales tan cómicas a que se someten héroes espaciales de mentón prominente, como los retratados en *Elegidos para la gloria*. Los colonos espaciales serán familias y comunidades normales que no estarán cumpliendo una misión, que solo intentarán vivir su vida. Necesitaremos algunos capitanes Picard, aunque lo más probable es que los primeros colonos serán en su mayoría agricultores y trabajadores de la construcción.

Eso sí, tendrán que ser genéticamente saludables. En las poblaciones pequeñas, los individuos portadores de enfermedades genéticas amenazan el futuro como no les es posible en una población de miles de millones. En un arca espacial, el destino biológico de la colonia estaría muy condicionado por la constitución genética de la población fundadora. Con que unos pocos viajeros los portasen, los genes de una enfermedad hereditaria acabarían difundiéndose ampliamente.

Conocemos los detalles de cientos de genes que producen dolencias, de cánceres a la sordera. (Hace poco, unos investigadores anunciaron que podían cribar más de 3500 de esos rasgos en fetos humanos.) Parece que un cribado genético sería sencillo —si se portan ciertos genes, no se sale de la Tierra—, pero la vida es más complicada que eso. Muchas enfermedades son poligénicas, es decir, son el resultado de complejas interacciones entre numerosos genes. Incluso si un individuo es portador del gen o genes de una determinada dolencia, los factores ambientales con que se encuentre en el curso de su existencia determinarán si se activan de una forma sana o maligna.

Por ejemplo, el gen humano *ATRX* ayuda a regular procesos relacionados con el transporte de oxígeno. Pero influencias ambientales tan diversas como la alimentación o el estado mental de una persona alteran la actividad de *ATRX*, y cuando su funcionamiento se modifica mucho el transporte de oxígeno se dificulta, lo que produce ataques, discapacidades mentales y retrasos en el crecimiento. Por eso no se puede cribar a los portadores de *ATRX*: todos lo somos. No obstante, se descontrola en algunas personas debido a factores ambientales de los que no se sabe mucho. ¿Podemos rechazar a alguien para la colonización espacial por algo que podría, y solo podría, suceder?

Una complicación adicional es que también tiene que haber una amplia diversidad en el acervo génico. Si los miembros de una población son genéticamente idénticos, un solo brote de una enfermedad podría acabar con todos. (Esta consideración echa por tierra la conveniencia de una superraza de viajeros del espacio desarrollada por ingeniería genética, como la que se describe en la película *Gattaca*, de 1997.)

Una vez hecho el cribado, ¿cuántos habitantes deberían tener las colonias espaciales? En una colonia marciana las poblaciones pueden crecer y expandirse por un nuevo territorio. Pero como en el arca espacial no habría un número muy elevado de colonos, la endogamia resultaría un problema. En un estudio de pequeñas poblaciones rurales amish, indias, suecas y de Utah, la mortalidad infantil era alrededor del doble cuando se emparejaban primos hermanos que cuando se emparejaban personas que no eran parientes.

Para evitar esos problemas deberemos tener en cuenta la población mínima necesaria para mantener un acervo génico saludable. Ha habido un amplio debate sobre la población mínima viable. Varios antropólogos han apuntado que debería ser de unos 500 individuos. Como las poblaciones pequeñas tienen



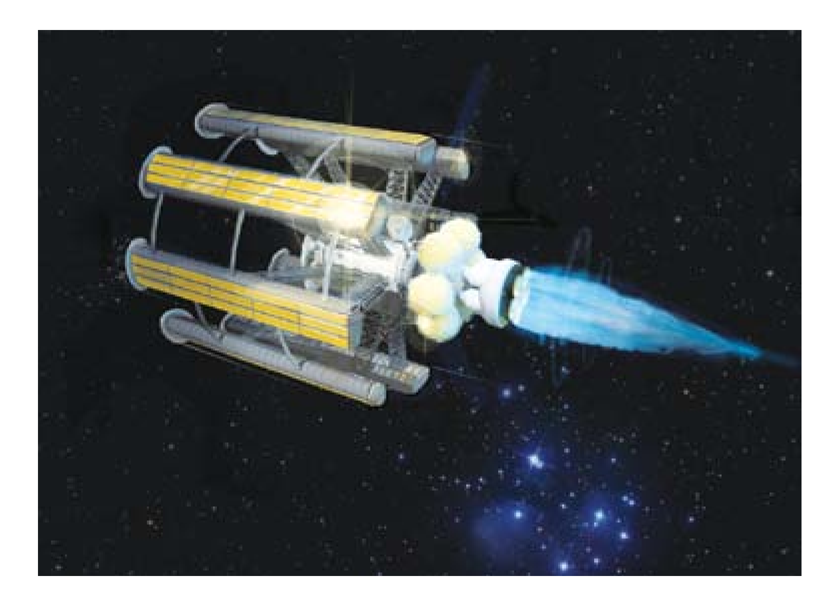
Cameron M. Smith es profesor de evolución humana en la Universidad estatal de Portland y autor de varios libros de divulgación científica.

EN SÍNTESIS

Una misión espacial que aísle lejos de la Tierra a personas durante períodos de tiempo larguísimos —una colonia en Marte o un viaje que dure varias generaciones a una estrella cercana— conducirá, de modo inevitable, a la aparición evolutiva de nuevos rasgos culturales y fisiológicos.

En las naves espaciales de larga distancia se correrán riesgos ambientales peculiares, como una radiación mayor y presiones atmosféricas menores. Tendrán consecuencias más graves en las etapas más frágiles de la vida: en el útero materno y justo después del parto.

Los planificadores de la misión tendrán que ser meticulosos al seleccionar a los viajeros espaciales. Su objetivo será una población genéticamente saludable pero con diversidad suficiente para resistir las posibles pandemias y florecer en ambientes muy distintos al de partida.



La forma de la nave: **La nave espacial interestelar tendrá que transportar miles de personas junto con las plantas y los animales necesarios para alimentarlas.**

CORTESÍA DE STEVE SUMMERFORD, ICARUS INTERSTELLAR - PROYECTO HYPERION

siempre un mayor riesgo de desaparecer, sugeriría que se empezase con una población de al menos cuatro veces ese mínimo —2000 individuos, lo que viene a ser la mitad de la tripulación de un portaviones bien dotado de personal—, albergada en una nave espacial con espacio suficiente para que pudiese crecer. Lejos de la Tierra, la seguridad de los seres humanos estará ligada al número. (Incluso los viajes interestelares se centrarán en alcanzar otro sistema solar y habitar sus planetas, donde las poblaciones podrán crecer de nuevo.)

También tendremos que poner cuidado en la estructura demográfica de la tripulación, es decir, en la edad y el sexo de las poblaciones de las colonias. Las simulaciones realizadas por mi colaborador William Gardner-O'Kearney muestran que las poblaciones que comienzan con determinadas proporciones de jóvenes y viejos, y de hombres y mujeres son las que persisten mejor a lo largo de varios siglos.

Las primeras poblaciones coloniales deberán ser, pues, individualmente sanas y colectivamente variadas para que las futuras generaciones tengan la mayor probabilidad de disponer de genes que en los nuevos ambientes resulten adaptativos. Pero no podemos controlarlo todo. En algún momento tendremos que tirar los dados genéticos —ya lo hacemos cada vez que decidimos tener hijos en la Tierra— y salir de nuestro planeta.

LA SELECCIÓN EN EL ESPACIO

Por mucho cuidado que se ponga en configurar las poblaciones coloniales, la vida fuera de la Tierra, al menos al principio, será más peligrosa y quizá más corta que en nuestro planeta. Lejos de la Tierra, las personas se expondrán a fuerzas de selección natural que hemos eliminado de la vida moderna. Solo una pequeña parte de esta selección se desarrollará con el dramatismo a que nos han acostumbrado las películas de ciencia ficción, que tienden a centrarse en la vida de los adultos. El grueso de la selección se producirá cuando la vida es más delicada, durante los períodos críticos del desarrollo de los tejidos en embriones y bebés.

¿Cómo se produciría la selección? El cuerpo humano ha evolucionado durante los últimos millones de años cerca del nivel del mar, donde se halla sometido a una presión atmosférica de alrededor de mil milibares y respira una mezcla de aproximadamente un 80 por ciento de nitrógeno y un 20 por ciento de oxígeno. Los viajes espaciales necesitan unos hábitats presurizados que resultan tanto más caros y laboriosos de construir cuanto mayor es la presión que han de mantener. Para no exigirle demasiado a la ingeniería, la presión atmosférica en cualquier estructura situada fuera de la Tierra será menor que en nuestro planeta.

Basta con eso: los astronautas de las misiones *Apolo* sobrevivieron sin problemas a una presión de 345 milibares. Pero cuando se disminuye la presión atmosférica se debe aumentar el porcentaje de oxígeno en el gas que se respira. Esos mismos astronautas respiraron en sus viajes lunares oxígeno con una concentración del 100 por cien.

Por desgracia, tanto una menor presión atmosférica como unos niveles altos de oxígeno interfieren en el desarrollo de los embriones de los vertebrados. Aumentarán los abortos espontáneos y la mortalidad infantil, al menos durante un tiempo. Inevitablemente, la selección preservará los genes adecuados para las condiciones extraterrestres y eliminará aquellos que no lo sean.

Las enfermedades infecciosas, a las que son vulnerables en especial las poblaciones densas y pequeñas, como la de una colonia espacial, volverán a preocupar mucho e impondrán también nuevas tensiones selectivas. Aunque seamos muy cuidadosos con la inmunización y la cuarentena, finalmente habrá plagas que azotarán las colonias y seleccionarán a los más capaces de sobrevivir a la enfermedad y eliminarán a quienes no puedan afrontarla.

Finalmente, debemos recordar que viajarán con nosotros miles de seres vivos domesticados —plantas y animales que servirían de alimento o como materiales— y que las tensiones selectivas también actuarán sobre ellos. Lo mismo cabe decir de los millones de especies microbianas que los cuerpos humanos llevan en su superficie y en su interior como si fueran invisibles autoestopistas genéticos, y que desempeñan un papel fundamental en nuestra salud [*véase* «El ecosistema microbiano humano», por Jennifer Ackerman; Investigación y Ciencia, agosto de 2012].

Basándome en unos pocos cálculos, creo que es razonable afirmar que en cinco generaciones de treinta años (unos 150 años) se manifestarían esos cambios en el cuerpo humano extraterrestre.

Las adaptaciones biológicas que cree la evolución dependerán mucho de los ambientes atmosféricos y químicos de los hábitats que construyamos. Se puede controlarlos en gran medida. Pero lo que no podemos controlar fácilmente son otros dos importantes factores que moldearán a la humanidad en el espacio: la gravedad y la radiación.

Los viajeros soportarán en Marte un tercio de la gravedad terrestre. Esta circunstancia seleccionará unas tallas corporales más livianas, que puedan moverse con menor esfuerzo que las estructuras más musculosas y voluminosas con que contrarrestamos la gravedad terrestre. En el arca espacial y en otras instalaciones flotantes la gravedad podría tener un valor cercano al terrestre, así que en ellas se mantendrían las estaturas que en la Tierra son normales.

La radiación produce mutaciones y sería improbable que las colonias espaciales, fueran como fueran, protegiesen de la radiación como la atmósfera y el campo magnético terrestres. ¿Dará lugar el aumento de mutaciones a errores físicos, que se manifestarían en partes repetidas, como un dedo adicional, o mal formadas, por ejemplo un labio leporino? Seguramente, pero no sabemos de qué clase. Solo cabe predecir que la selección favorecería una mayor resistencia al daño por radiación. Algunas personas tienen mejores y más activos mecanismos de reparación del ADN; será más probable que transmitan sus genes.

¿Podrían los mecanismos más eficaces de reparación del ADN guardar una correlación visible, digamos que con un determinado color de pelo? Nuevamente, no lo sabemos. Pero también es posible que una genética beneficiosa se extienda aunque no presente una correlación visible. Los antropólogos han descubierto que el olor corporal parece tener una gran influencia en la elección de pareja por los huteritas de Dakota del Sur, que solo se cruzan con individuos de un número reducido de pequeñas comunidades. Y todavía más fascinante: cuanto mejor es el sistema inmunológico de la persona, mejor es su olor.

En una escala temporal no muy dilatada, de cinco generaciones, el entorno ambiental remodelará sutilmente los cuerpos humanos. Veremos adaptaciones del estilo de las que muestran los nativos de los Altos Andes y del Tíbet, donde la evolución ha producido una fisiología más eficaz para el transporte de oxígeno, con unos pechos más anchos y profundos. Pero no hay alteración sin contrapartida: estas poblaciones tienen una mayor mortalidad infantil cuando paren en las alturas a las que están adaptadas. Este cambio biológico ha engendrado a su vez una adaptación cultural: las madres descienden a altitudes más ricas en oxígeno para dar a luz. Se pueden esperar modificaciones culturales semejantes fuera de la Tierra, y deberíamos prepararnos para las que sean más probables. Por ejemplo, las madres que den a luz en Marte deberían desplazarse a una estación orbital, donde el parto tendría lugar en una instalación rotatoria que generaría 1 g de gravedad simulada y donde la atmósfera se parecería más a la terrestre, pero apuesto a que al final no se molestarían en hacerlo y la evolución produciría en Marte características humanas distintivas.

UNA CULTURA EN EL ESPACIO

En un período de 150 años, los cambios culturales serán más evidentes que los biológicos. El estudio de las migraciones humanas nos ha enseñado que, mientras los emigrantes tienden a preservar algunas tradiciones para no perder la identidad, también crean nuevas tradiciones y costumbres, necesarias en sus nuevos ambientes. Por ejemplo, los escandinavos que colonizaron Islandia en el siglo IX siguieron adorando a los dioses nórdicos y hablando la lengua vikinga, pero enseguida crearon una gastronomía diferente, muy abundante en alimentos en conserva y en carne (en Escandinavia cultivaban el centeno y la avena) para sobrevivir a los crudos inviernos mientras exploraban los recursos de una tierra desconocida.

En Marte, esa aculturación se manifestará de innumerables formas. Allí, en atmósferas de baja presión y ricas en oxígeno, confinadas en estructuras y materiales arquitectónicos singulares, el sonido podría propagarse de modo diferente —aunque la diferencia fuera sutil—, lo que afectaría quizás a la pronunciación e incluso al ritmo de la expresión oral, lo cual, a su vez, produciría nuevos acentos y dialectos. Una menor gravedad quizás influiría en el lenguaje corporal, elemento importante de la comunicación humana, y en las artes escénicas del tipo que fuese. La divergencia cultural sucede precisamente por acumulación de estas pequeñas e innumerables diferencias.

Un cambio cultural más profundo podría darse en situaciones como la del arca espacial, donde la vida cada vez tendría menos que ver con la Tierra conforme la nave se fuese alejando de nuestro planeta. En un caso así, es muy posible que los conceptos básicos de espacio y tiempo se transformaran con bastante rapidez. ¿Durante cuánto tiempo utilizarían las culturas de arcas espaciales la cronología terrestre? Sin los días, noches y años terrestres, las civilizaciones quizás inventarían una escala de base 10 para contar el tiempo. O bien podrían optar por una cuenta atrás hasta que se alcanzase un lejano sistema solar, en lugar de contar hacia adelante a partir de algún acontecimiento del pasado (como la salida de la Tierra, adonde nunca regresarían).

CAMBIOS GENÉTICOS A LARGO PLAZO

Los cambios genéticos importantes tienen lugar cuando variantes nuevas de genes pasan a ser corrientes en una población. Un ejemplo prehistórico fue la difusión de genes que hacían que los adultos tolerasen la lactosa, tal y como ocurrió independientemente en África y en Europa a poco de que se domesticase el ganado. Este bagaje genético permitió que del ganado se sacase más energía, y en esas poblaciones se convirtió rápidamente en un rasgo casi universal, o «fijado».

Aunque no podemos predecir la clase de mutaciones que aparecerán, con la genética de poblaciones podemos estimar el tiempo que tardarán en fijarse en el genoma de los exploradores del espacio. Mis cálculos, basados en modelos de poblaciones marcianas de 2000 personas, con determinadas estructuras de sexo y edad, indican que podría ocurrir al cabo de solo unas generaciones, y con seguridad dentro de trescientos años; podemos esperar que en esa escala de tiempo aparezcan en las poblaciones humanas que vivan fuera de la Tierra características físicas originales de alguna importancia. Estos cambios serán de una magnitud semejante a la amplia variación geográfica que vemos actualmente en las personas, un espectro de distintos colores de piel, estaturas, texturas de pelo y otros rasgos.

En Marte podría haber cierta divergencia adicional, una divergencia interna, ya que algunas poblaciones elegirían pasar la mayor parte de su vida en hábitats subterráneos, mientras que otras preferirían asumir los riesgos del aumento de radiación y vivir en la superficie, que permite una mayor movilidad. En el caso del arca espacial, como sistema cerrado con una población limitada, la fijación de genes ocurriría con mucha mayor rapidez e impulsaría quizás una mayor uniformidad que en Marte.

Habrá, pues, algún cambio biológico, pero el cambio cultural a largo plazo será más hondo. Basta tener en cuenta que en los tres siglos que van desde principios del siglo XVII hasta principios del XX la lengua inglesa cambió tanto que para comprender hoy textos escritos en el inglés del siglo XVII se necesita alguna preparación. Después de tres siglos, el lenguaje hablado en un arca espacial podría ser muy distinto.

También es bastante probable un cambio cultural a mayor escala. Se debate mucho en antropología acerca de en qué consiste exactamente lo que separa a una cultura de otra, pero creo que el antropólogo Roy Rappaport lo dejó claro. Las culturas diferentes tienen distintos «postulados sagrados fundamentales», conceptos básicos, generalmente incuestionables e incues-



La vida en el espacio: No podemos predecir cómo cambiará la cultura en una remota colonia espacial a lo largo de cientos de años. Solo sabemos que lo hará.

CORTESÍA DE STEVE SUMMERFORD, ICARUS INTERSTELLAR - PROYECTO HYPERION

tionados, enraizados por la tradición y los ritos, que dan forma a los códigos filosóficos y morales esenciales de una población. Para la cristiandad, por ejemplo, uno de estos postulados es: «En el principio creó Dios el Cielo y la Tierra». Es imposible calcular el tiempo que tardarían las creencias fundamentales en cambiar fuera de la Tierra y la dirección que tomarían, pero un período de varios siglos es tiempo suficiente para que surjan nuevas culturas.

LA APARICIÓN DEL *HOMO EXTRATERRESTRIS*

¿Cuándo veremos un cambio biológico incluso más fundamental, es decir, una especiación? Las poblaciones pequeñas pueden cambiar deprisa, como evidencian los ratones inusualmente grandes que rondan por las islas Feroe 1200 años después de que los barcos vikingos desembarcaran ratones domésticos comunes. Pero los humanos anatómicamente modernos se han pasado más de 100.000 años emigrando desde África a entornos muy variados, a desiertos, al mar abierto, sin que se haya producido ninguna especiación biológica. (Nuestros parientes homininos más cercanos, como los neandertales, adaptados al frío, y los «hobbits», los humanos al parecer miniaturizados de la isla de Flores, del Pacífico occidental, se separaron de nuestro antecesor común bastante antes.) Es así, sobre todo, porque para adaptarnos usamos más la cultura y la tecnología que la mera biología. Reconfigurar los humanos extraterrestres hasta tal punto que ya no pudieran unirse reproductivamente con los terrícolas requeriría, pues, una selección natural y cultural muy considerable.

A no ser, claro está, que los humanos dispusiesen su propia especiación. Parece inevitable que quienes vivan fuera de la Tierra acaben por aprovechar el asombroso poder del ADN para remodelar su cuerpo según las circunstancias. Por medio de la ingeniería biológica, los habitantes de Marte quizá se doten de estructuras semejantes a branquias para separar el oxígeno del dióxido de carbono atmosférico, o quizás endurezcan su piel y tejidos para soportar la baja presión. Podrían convertirse a sí mismos, con plena conciencia, en una nueva especie, *Homo extraterrestris*.

¿POR DÓNDE EMPEZAR?

La colonización humana del espacio exigirá muchos avances de la técnica y de la ingeniería. Debemos mejorar además nuestros conocimientos sobre cómo se adaptan la biología y la cultura humanas a nuevas condiciones, y valernos de ellos para que la colonización del espacio pueda tener éxito. Sugiero empezar inmediatamente con tres vías de actuación.

Primero, debemos dejar a un lado la repugnancia que la humanidad les produce a los tecnócratas y procrear, dar a luz y criar fuera de la Tierra; así comprenderemos mejor la reproducción, el desarrollo y el crecimiento humanos, factores de importancia decisiva, en unas condiciones de radiación, presión, atmósfera y gravedad nuevas. Los burócratas se resistirán por los riesgos que implica —¡exponer a niños a riesgos mayores que los que corre un ciclista con casco en una zona residencial del Primer Mundo!—, pero la preocupación irá decreciendo a medida que se privatice el acceso al espacio. De vez en cuando la adaptación al espacio será dolorosa, pero también lo es un parto.

En segundo lugar, debemos experimentar fuera de la Tierra con la cría de especies domesticadas y la preservación de su salud. No vamos a ninguna parte sin nuestros microbios, plantas y animales.

Para estimular estos dos primeros objetivos se debería otorgar al primer hábitat humano funcional y habitable fuera de la Tierra un premio de los que concede a los avances técnicos la Fundación X; no a un laboratorio orbital estéril, por importantes que sean las instalaciones así, sino a un hogar donde se pueda cultivar plantas, criar animales e incluso tener hijos. Muchos se estremecerían ante la perspectiva de encerrarse en semejante lugar, pero no faltarían tampoco los voluntarios.

Finalmente, debemos volver a adelantarnos a los acontecimientos, porque esa es la manera de proceder que ha posibilitado, hasta la fecha, la supervivencia humana; con nuestra capacidad anticipadora debemos moldear, más allá del planeta que nos alberga, nuestra propia evolución. Debemos ser muchísimo más audaces que las administraciones públicas. Si fracasamos en esto, con el tiempo nos extinguiremos, igual que lo demás en la Tierra. Como escribió H. G. Wells en 1936 acerca del futuro humano, es «todo el universo o nada».

PARA SABER MÁS

Leaving Earth: Space stations, rival superpowers, and the quest for interplanetary travel. Robert Zimmerman. Joseph Henry Press, 2003.

Blindajes espaciales. Eugene N. Parker en *Investigación y Ciencia*, mayo 2006.

How to live on Mars: A trusty guidebook to surviving and thriving on the Red Planet. Robert Zubrin. Three Rivers Press, 2008.

Emigrating beyond Earth: Human adaptation and space colonization. Cameron M. Smith y Evan T. Davies. Springer Praxis Books, 2012.

INGENIERÍA MÉDICA

Conexiones biónicas

Un nuevo método para conectar brazos y manos artificiales al sistema nervioso podría permitir que el cerebro controlara las prótesis con la misma facilidad que si se tratara de las extremidades de nuestro cuerpo

D. Kacy Cullen y Douglas H. Smith

En una de las escenas míticas de la ciencia ficción llevada al cine, Luke Skywalker mira su mano y su antebrazo nuevos. El héroe de *La guerra de las galaxias* mueve sus dedos mediante la extensión y la contracción de pistones que se muestran a través de una pequeña placa abierta en la muñeca. Siente luego el pinchazo del cirujano robótico en un dedo. No es solo que Skywalker pueda mover la prótesis con el pensamiento, es que además la siente como si fuera su propia mano.

Sin embargo, el espectador no puede ver la conexión real entre el hombre y la máquina. Los neurocientíficos desearíamos contemplar esa interfaz oculta en el centro de la escena. Para que tal conexión funcionara, tendría que convertir los impulsos nerviosos del cerebro en señales eléctricas en el brazo artificial, y viceversa. Pero más allá del mundo del celuloide, nadie ha logrado todavía resolver cómo empalmar nervios y cables eléctricos de modo que controlen la extremidad artificial como si fuera una extensión natural de nuestro propio cuerpo.

No hemos de sorprendernos ante semejante frustración. Por un lado, los nervios y los cables eléctricos, necesarios para regular la electrónica de una prótesis, transmiten tipos de señales completamente distintos. Los dispositivos electrónicos dependen del flujo de electrones en materiales conductores a través de semiconductores y transistores; el sistema nervioso se basa en la despolarización de la membrana celular y la liberación de señales químicas en los hiatos entre neuronas. Por otro lado, la conexión requeriría la implantación de cables y otros dispositivos electrónicos en el organismo, que, en condiciones normales, percibe como extraños tales implantes y, por lo tanto, desencadena respuestas que generarían tejido de cicatrización alrededor de la interfaz y perturbarían su funcionamiento.

Sin embargo, los avances registrados en los últimos años en el campo de la nanotecnología y de la ingeniería de tejidos abordan ambos retos. En lugar de intentar forzar que los nervios se comuniquen directamente con la electrónica común de las prótesis modernas, los autores del artículo y otros investigadores se aprestan a tender nuevos tipos de puentes entre nervios y extremidades artificiales (conexiones que aprovechan la habilidad innata del sistema nervioso para adaptarse a nuevas situaciones). De hecho, las investigaciones recientes nos han acercado al objetivo de desarrollar una extremidad artificial que, como la de Luke Skywalker, sea controlada y percibida por el cerebro.

COMBINACIÓN DE AFERENCIAS SENSORIALES Y MOTORAS

Para bien o para mal, gran parte del progreso en el diseño de prótesis se ha producido gracias a conflictos armados (los más recientes, las guerras de Afganistán y de Irak). No obstante, hasta hace tan solo unos años, los diseñadores se concentraban sobre

JEAN-FRANÇOIS PODEVIN



Logros: Los avances en neuroingeniería comienzan a alcanzar el enorme progreso realizado recientemente en el diseño de prótesis.

todo en las extremidades inferiores, no en las superiores. El desarrollo de piernas protésicas que permitan al usuario caminar y correr es una propuesta de ingeniería mucho más sencilla que concebir una mano artificial que posibilite a su usuario destapar frascos o mecanografiar en un teclado de ordenador. Desde 2006, con el lanzamiento del programa «Revolucionar la protésica», de la Agencia de Proyectos Avanzados del Departamento de Defensa de EE.UU. (DARPA, por sus siglas en inglés), se han dado también pasos impresionantes hacia la creación de extremidades superiores artificiales de alto refinamiento.

Parte del reto que plantea el diseño de extremidades superiores altamente funcionales estriba en la necesidad de replicar (en cierta medida, al menos) el exquisito control fino de los movimientos de la mano. Una empresa que requiere capacidad para acceder a los mapas mentales del propio cerebro, que son necesarios para transmitir señales nerviosas a fibras musculares específicas que controlan el antebrazo y saber cuándo recibe el cerebro señales nerviosas (sobre la presión, la posición, la tensión, el momento y la fuerza), procedentes del brazo y la mano, donde se originan dichos mensajes. Esta información sensorial retroactiva permite al cerebro determinar la cantidad de fibras musculares que deben activarse para realizar un determinado esfuerzo.

En una extremidad intacta, esas señales motoras y sensoriales trabajan en equipo para crear, entre otras cosas, el sentido de propiocepción (consciencia de la posición de cada parte del cuerpo en el espacio y en relación a otras partes del cuerpo sin necesidad de mirarla). Sin propiocepción, incluso lo que nos pueden parecer tareas sencillas, tales como escribir con un bolígrafo, serían casi imposibles. Gracias a una sinfonía de señales del sistema nervioso entre cerebro y extremidades, podemos mover la mano, segura hacia el bolígrafo, alzar este ligeramente mientras lo colocamos en la posición correcta y apoyarlo con suavidad para escribir.

Hasta la fecha, las manos robóticas que se han desarrollado permiten diversos niveles de control motor indirecto. En algunos casos, a través de la repetición de contracciones y relajaciones de músculos del muñón o del tórax, es posible activar relés especializados que provocan distintos movimientos en la extremidad artificial. Sin embargo, lo que los bioingenieros desearían construir es una prótesis que estuviera unida a los nervios motores originales y por estos controlada. Tales nervios no mueren tras la amputación, sino que simplemente se retraen algo desde los bordes del muñón.

Pero el uso de las neuronas motoras es tan solo parte de la historia. Debido a la ausencia de señales sensoriales que viajen desde la extremidad artificial hacia el cerebro, muchas tareas sencillas son todavía difíciles a pesar de los avanzados dispositivos prostéticos de hoy en día. Las personas con alguna amputación tienen que controlar conscientemente cada pequeño movimiento de su prótesis; y dependiendo tan solo de lo que ven sus ojos para guiarse, sin poder usar su sentido natural de propiocepción. Ello produce unos movimientos lentos y torpes, que necesitan un grado de concentración tal que la persona termina exhausta tras una tarea simple como abotonar una camisa.



D. Kacy Cullen es neuroingeniero y profesor ayudante de neurocirugía en la Universidad de Pensilvania.



Douglas H. Smith dirige el Centro de Lesión y Reparación Cerebral y es profesor de neurocirugía en la Universidad de Pensilvania; también es cofundador de Axonia Medical.

Un objetivo fundamental es, por tanto, diseñar una interfaz entre el sistema nervioso y la prótesis que permita una comunicación bidireccional entre la información motora y sensorial. Tal interfaz «neuromecánica» posibilitaría el desarrollo de manos protésicas controladas por el pensamiento intuitivo y sentidas como si fueran reales. Varios laboratorios de investigación, incluido el nuestro, persiguen ese objetivo. Aunque cada uno hemos adoptado estrategias algo diferentes, el éxito dependerá probablemente de una combinación de los descubrimientos y las innovaciones tecnológicas de los grupos implicados.

DOS ESTRATEGIAS PRINCIPALES

El primer paso para la creación de una interfaz útil entre el cuerpo y una extremidad protésica consiste en decidir en qué parte del sistema nervioso colocarla. A los diseñadores se les presentan dos opciones: interaccionar con el sistema nervioso central (mediante una conexión al cerebro o a la médula espinal) o ir más lejos y operar con el sistema nervioso periférico, cuyos nervios se extienden principalmente entre la médula espinal y el resto del organismo.

Hasta la fecha, la mayoría de los investigadores se han centrado en el cerebro como punto de partida. Las estrategias menos invasivas captan la actividad neural por medio de electrodos externos aplicados sobre el cuero cabelludo o justo bajo el cráneo, sobre la superficie del encéfalo. Los electrodos captan las señales eléctricas del cerebro, que un ordenador analiza para indicar el movimiento deseado. Estos métodos tienen la ventaja de no precisar la perforación intrusiva del cerebro, pero se hallan expuestos a interferencias con otros dispositivos electrónicos. Las señales eléctricas son, además, burdas representaciones de lo que el cerebro está realmente haciendo, por lo que es difícil para el ordenador predecir los movimientos que deberían producirse.

La estrategia más invasiva inserta directamente una matriz de microelectrodos sobre las capas exteriores del cerebro. (Los microelectrodos habituales son sondas de silicio de alta densidad con un diámetro menor que el de un cabello humano.) Al tratarse de una interfaz directa, la estrategia ofrece la enorme ventaja de aportar datos sumamente precisos y ricos (tales como la intensidad y frecuencia de disparo de neuronas singulares). La idea consiste en aplicar programas informáticos diseñados específicamente para decodificar o traducir esa información en una acción apropiada. Con una información tan de-

EN SÍNTESIS

Los bioingenieros se proponen conectar prótesis de brazos y manos directamente con el sistema nervioso.

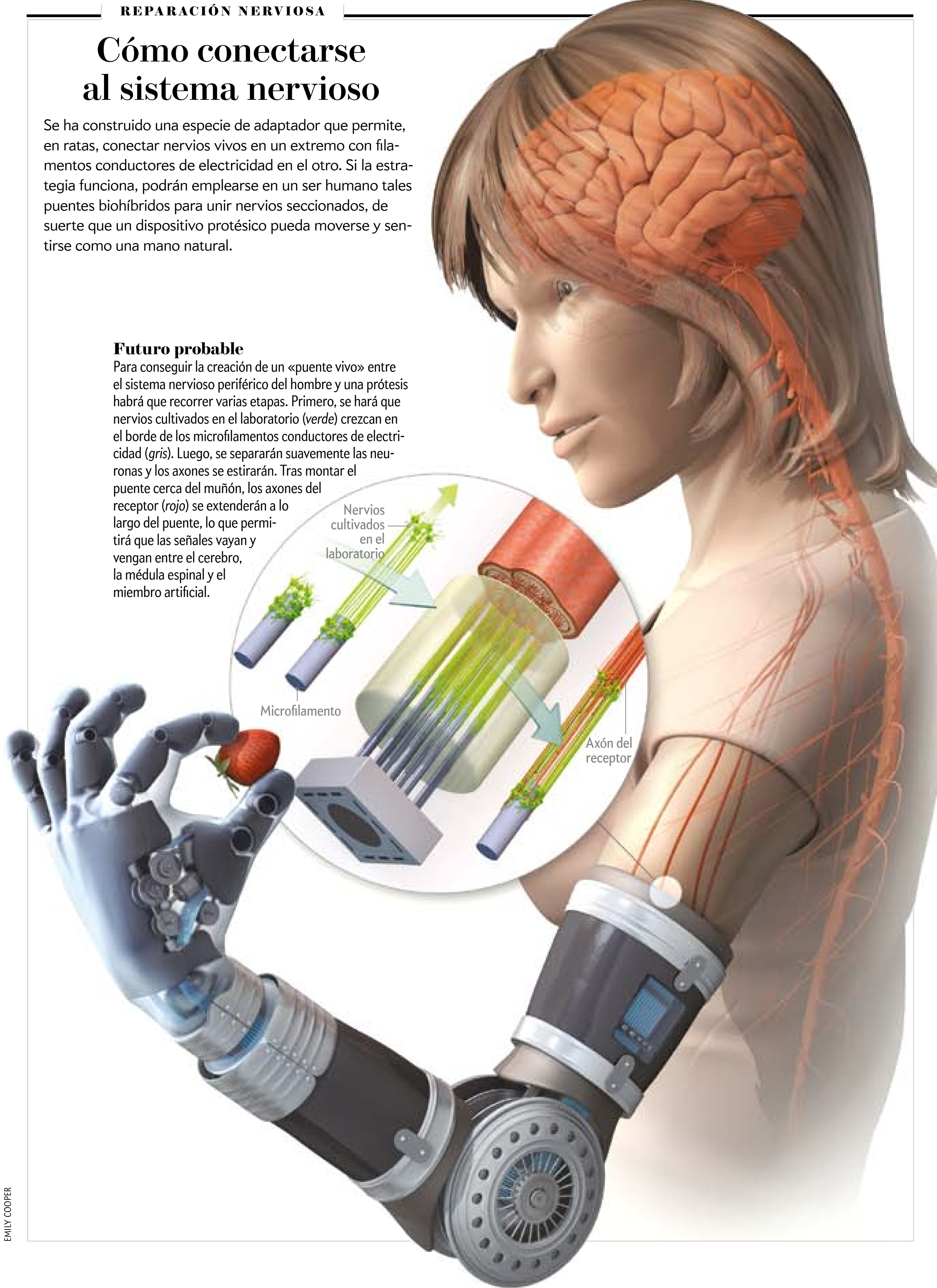
Una comunicación bidireccional permitiría que el cerebro controlara los movimientos de las extremidades y que sintiera su presencia.

El primer paso consiste en desarrollar una suerte de adaptador que traduzca los impulsos nerviosos en señales eléctricas.

Los autores están desarrollando esa interfaz con fibras nerviosas cultivadas en el laboratorio y polímeros conductores de electricidad.

Cómo conectarse al sistema nervioso

Se ha construido una especie de adaptador que permite, en ratas, conectar nervios vivos en un extremo con filamentos conductores de electricidad en el otro. Si la estrategia funciona, podrán emplearse en un ser humano tales puentes biohíbridos para unir nervios seccionados, de suerte que un dispositivo protésico pueda moverse y sentirse como una mano natural.



Futuro probable

Para conseguir la creación de un «puente vivo» entre el sistema nervioso periférico del hombre y una prótesis habrá que recorrer varias etapas. Primero, se hará que nervios cultivados en el laboratorio (*verde*) crezcan en el borde de los microfilamentos conductores de electricidad (*gris*). Luego, se separarán suavemente las neuronas y los axones se estirarán. Tras montar el puente cerca del muñón, los axones del receptor (*rojo*) se extenderán a lo largo del puente, lo que permitirá que las señales vayan y vengan entre el cerebro, la médula espinal y el miembro artificial.

EMILY COOPER

tallada, cabría, en teoría, lograrse un control exquisito de una extremidad artificial.

Las conexiones directas con el cerebro se están ensayando ya en decenas de personas. En uno de los casos, una mujer que sufre parálisis subsecuente a un accidente cerebrovascular pudo servirse de un brazo robótico para beber café de un vaso; se valió del pensamiento para guiar el dispositivo. Y en 2012 DARPA lanzó una iniciativa que, por primera vez, usará electrodos insertados en el cerebro para controlar brazos protésicos de última generación en individuos que han perdido extremidades superiores. En ambos casos, los electrodos que registran la actividad de las neuronas están conectados con cables que emergen del cráneo. Posteriormente la señal se decodifica por un potente ordenador, que a su vez transmite las órdenes al brazo robótico. En el futuro se espera poder enviar la información por vía inalámbrica, de suerte que el usuario no tenga que estar atado a un ordenador para utilizar el brazo sintético. Por desgracia, la potencia de computación necesaria aún no puede ser empaquetada en un tamaño suficientemente pequeño como para internalizarla, como sería deseable en un entorno realista.

Otro inconveniente reside en la respuesta de rechazo: que el tejido cerebral trate los electrodos internos como un objeto extraño y desencadene una respuesta inflamatoria que termine por rodear, con tejido de cicatrización, a los electrodos. El tejido de cicatrización, a su vez, hace que se reduzca de manera exponencial el número de células nerviosas que pueden ser monitorizadas, lo que provoca que la señal vaya debilitándose y perdiendo información con el tiempo. En algunos pacientes, los electrodos han seguido registrando la actividad de una o más neuronas durante varios años, pero esos casos son excepcionales. Los investigadores buscan ahora el modo de minimizar la intensa reacción del cuerpo contra los objetos extraños que entran en el cerebro.

VENTAJAS PERIFÉRICAS

Las dificultades expuestas nos indujeron a trabajar con el sistema nervioso periférico. El sistema nervioso central consta de unos 100.000 millones de células nerviosas; en cambio, el periférico está compuesto principalmente de fibras (axones) que se empaquetan para formar nervios. Los axones son, en esencia, proyecciones muy largas, a veces de hasta un metro de longitud, de las neuronas; transmiten las señales eléctricas entre el sistema nervioso central y el resto del cuerpo.

Algunas de esas fibras nerviosas periféricas conectan la médula espinal con los músculos y, así, permiten que el cerebro controle las funciones motoras mandando señales curso abajo de la médula espinal. Otras fibras nerviosas periféricas transmiten información sensorial (como la posición de la extremidad, la temperatura o el tacto) del cuerpo a la médula, que la remite al cerebro para continuar su procesamiento ulterior.

Debido a que los nervios sensoriales que quedan en el muñón continúan a menudo emitiendo señales como si estuvieran recibiendo información del brazo o pierna ausente, muchos pacientes amputados sienten que la extremidad continúa ahí (estado conocido como síndrome del miembro fantasma). Si se pudiera enganchar esos axones con errores de actividad a una prótesis artificial que mandara señales contundentes a los nervios, el cerebro podría fácilmente interpretar las señales aferentes como provenientes de un antebrazo, una mano y sus dedos.

Asimismo, los axones motores del sistema nervioso periférico mantienen la capacidad de dirigir los movimientos. Dado que el cerebro conserva la habilidad de coordinar y asociar las señales motoras con diferentes movimientos, mandaría órdenes a un miembro artificial adecuadamente conectado para que se moviera de un modo natural.

El problema consiste en que los axones periféricos no crecerán a menos que tengan un blanco biológico con el que puedan establecer contacto. Es más, como sucede en el sistema nervioso central, el cuerpo tiende a reaccionar contra los cables implantados en los nervios periféricos.

Todd Kuiken y su grupo, de la Universidad del Noroeste, han mostrado, en voluntarios humanos, una ingeniosa solución del problema: emplean músculos del tórax como puente entre el muñón del miembro amputado y la electrónica interna del dispositivo protésico. Primero, se cortan los nervios motores de unos cuantos músculos superficiales del tórax; dejan así de recibir interferencias de las señales del cerebro. Después, los axones motores que anteriormente conectaban la médula espinal y la parte amputada del brazo se redirigen con cuidado para conectarse con los músculos superficiales del tórax. En cuestión de semanas, los nervios redirigidos conectan perfectamente con los músculos torácicos; es decir, los inervan. Las órdenes del cerebro que servían para estimular el miembro perdido viajan ahora hasta el tórax, provocando la contracción muscular.

La innata capacidad de adaptación del sistema nervioso permite a los científicos crear «puentes vivos» entre los nervios de un muñón y prótesis electrónicas

En ese momento, se instalan electrodos sobre la piel del tórax para registrar la actividad eléctrica de cada músculo al contraerse. Los registros producidos revelan indirectamente, a su vez, las señales provenientes del cerebro. Tras algunas semanas de entrenamiento, los pacientes pueden mover sus prótesis con solo pensar en lo que quieren que haga el dispositivo. Por ejemplo, pensar en sujetar una taza provoca un patrón determinado de contracciones en el tórax que, a su vez, «le dicen» a la electrónica de la prótesis que doble los dedos de la mano artificial.

Kuiken y su grupo ha aplicado esa estrategia, conocida como reinervación muscular predirigida, en una docena de pacientes con amputaciones. Pero todavía queda por ver si dicha técnica proporcionará el fino control motor necesario para recrear todos los movimientos naturales de una mano y un brazo reales.

PUENTES NEURALES

Creemos que el control motor fino de un brazo artificial requerirá, en último término, una conexión diferente entre el tejido vivo y la prótesis. Afortunadamente, los músculos no son el único tejido que los nervios seccionados inervarán. Los nervios podrán también crecer hacia otros nervios y llegar incluso a aceptar nervios trasplantados como parte de la familia, por decirlo de algún modo. Por ello, hace seis años decidimos explorar la posibilidad de emplear fibras nerviosas trasplantadas, en vez de músculos, como intermediarios entre los axones seccionados del muñón y el cableado eléctrico de un dispositivo protésico.

Para crear un puente neural de este tipo, primero hace falta imaginar el modo de generar fibras nerviosas de suficiente longitud, que cubran el vacío entre los axones del receptor y la electrónica. Uno de los autores (Smith) ha desarrollado una técnica para tirar de los extremos de axones crecidos en un cultivo celular, ayudándoles a alcanzar la longitud necesaria. Este proce-

so aprovecha la habilidad natural de los nervios para elongarse durante períodos de crecimiento. Uno de los ejemplos más extremos de este tipo de «crecimiento por estiramiento» nos lo ofrecen los axones de la médula espinal de la ballena azul, que pueden alargarse más de tres centímetros al día y alcanzar una longitud de hasta 30 metros.

Procedemos de la forma siguiente: tomamos un cultivo de neuronas y lo dividimos en dos, alejando las mitades un poco cada día. Los axones del medio se estiran, por lo que necesitan crecer en ambas direcciones para liberar la tensión. Aprovechándonos de este proceso mecánico natural, hemos desarrollado unos dispositivos, los «alargadores de axones», que pueden hacer crecer por estiramiento grupos de axones a una frecuencia experimental sin precedentes, de un centímetro por día; así, llegan a medir unos 10 centímetros y puede que, con el tiempo, incluso más.

Una de nuestras primeras aplicaciones de ese crecimiento por estiramiento de los axones fue su uso como puente vivo para reparar nervios periféricos seccionados, como ocurre en traumatismos o en cirugía. Cuando implantamos esos grupos de axones de suerte que uno de los extremos se hallara cerca de la punta de un nervio seccionado en ratas, los axones del nervio se elongaron y desarrollaron a lo largo del puente. De hecho, muchos de los axones fueron avanzando poco a poco en el miembro anteriormente paralizado hasta el punto de que el nervio se restauró por completo y las ratas recuperaron su funcionalidad.

Además, determinamos que los puentes neurales sobrevivían al menos cuatro meses tras el trasplante (sin desencadenar ninguna reacción inmunitaria). De hecho, nuestros puentes neurales funcionaron tan bien en ratas que ahora estamos probándolos en cerdos. Si estos experimentos tienen éxito, comenzaremos a hacer pruebas en personas que hayan sufrido recientemente una lesión nerviosa importante.

Tras haber demostrado el modo en el que se puede dirigir y estimular los axones seccionados para que vuelvan a crecer, nos aprestamos a crear un puente más complicado que permitiera a los axones comunicarse con la electrónica de una prótesis. Nos proponíamos encontrar filamentos finos y conductores que el cuerpo no percibiera como extraños. Después de algunos tanteos, decidimos crear nuestros filamentos usando varios polímeros conductores; uno de ellos, la polianilina, compuesto orgánico basado en nitrógeno que se sabe desde hace tiempo que conduce la corriente eléctrica y que otros estudios parecían indicar que era tolerado por el cuerpo. Hasta ahora, al menos en estudios sobre roedores, esos polímeros especializados no parecen provocar una fuerte reacción del sistema inmunitario.

El siguiente paso fue inducir que un grupo de neuronas cultivadas in vitro crecieran en torno a un extremo de esos microfilamentos, para luego hacer crecer por estiramiento los axones hacia el nervio del receptor. (El otro extremo del microfilamento conectaría con la prótesis vía un transmisor inalámbrico.) En teoría, los axones de un muñón deberían crecer a lo largo de nuestros axones estirados y establecerían contacto con los filamentos, que recogerían señales eléctricas de los axones motores del muñón y las transmitirían a la electrónica; de este mismo modo, las señales sensoriales enviadas desde la electrónica podrían viajar por los filamentos, despolarizando a los axones sensoriales que habrían crecido en el puente y enviando la información hacia la médula espinal y el cerebro.

Al aplicar esa estrategia en ratas, hemos observado que el tejido nervioso crecido por estiramiento proporciona una vía que guía a los axones en regeneración del receptor unas cuantas decenas de micras a lo largo de los filamentos del polímero. Una distancia suficientemente corta para permitir que diferentes filamentos puedan registrar las señales de los nervios que bajan en una dirección (hacia el miembro) y estimular a los nervios que van en la otra dirección (hacia el cerebro). En esencia, hemos creado un simple adaptador que conecta entre sí dispositivos con distintos enchufes. Nuestro híbrido de tejido biológico (las neuronas y sus axones estirados) y un conductor no biológico permitiría que la electrónica de una prótesis se enchufara a un extremo y los axones de un muñón al otro. Hasta ahora, estos biohíbridos han sobrevivido y se han mantenido integrados en el nervio del receptor, al menos durante un mes tras el trasplante, lo que sugiere que el sistema inmunitario los tolera sin problema, porque si fuera de otro modo los habría destruido en cuestión de días. Se están realizando ahora mismo ensayos de tiempos más largos.

PRÓXIMOS PASOS

Aunque prometedora, nuestra estrategia biohíbrida de ingeniería neural está todavía en pañales. Ignoramos cuánto tiempo durarán esos puentes; tampoco sabemos si, a la larga, el sistema inmunitario tolerará los componentes basados en polímeros. Además, necesitamos minimizar las interferencias con otros dispositivos electrónicos, así como mejorar la sensibilidad de las señales nerviosas individuales que se transmiten desde el puente hasta la prótesis. Y aunque conectemos las neuronas del muñón de un miembro con una prótesis, no tenemos garantía de que el cerebro vaya a ser capaz de conferir significado a las señales que se originen en la prótesis.

La experiencia obtenida con trasplantes de mano indica que el cerebro podría estar preparado para la tarea. Cuando se realizan tales trasplantes, a los cirujanos les resulta imposible conectar correctamente en la mano todas y cada una de las fibras nerviosas del receptor. Una precisión que, sin embargo, resulta innecesaria. El cerebro cartografía de nuevo su propio mapa interno sobre qué hace cada neurona motora, permitiendo al final controlar la nueva mano. Del mismo modo, el cerebro necesitará probablemente mucho reentrenamiento para manejar una mano robótica unida al sistema nervioso.

Para progresar más en el control de miembros protésicos habrá que combinar los avances en la investigación del sistema nervioso central con los correspondientes a la del sistema periférico. Pero las conexiones directas entre el cerebro y prótesis avanzadas (mediante acceso directo al cerebro, a través de músculos del tórax reprogramados, o estableciendo enlaces a través de puentes biohíbridos) constituyen la mejor oportunidad para obtener un brazo artificial que se mueva con la gracia y naturalidad del original. A pesar de que la interfaz entre Luke Skywalker y su nuevo brazo nunca fue revelada en *El Imperio contraataca*, los científicos ya empiezan a imaginarse su diseño.

PARA SABER MÁS

Stretch growth of integrated axon tracts: Extremes and exploitations. Douglas H. Smith en *Progress in Neurobiology*, vol. 89, n.º 3, págs. 231-239, noviembre de 2009.

Neural tissue engineering and biohybridized microsystems for neurobiological investigation in vitro, Part 1. D. Kacy Cullen, John A. Wolf, Varadraj N. Vernekar, Jelena Vukasinovic y Michelle C. LaPlaca en *Critical Reviews in Biomedical Engineering*, vol. 39, n.º 3, págs. 201-240, 2011.

Neural tissue engineering for neuroregeneration and biohybridized interface microsystems in vivo, Part 2. D. Kacy Cullen, John A. Wolf, Douglas H. Smith y Bryan J. Pfister en *Critical Reviews in Biomedical Engineering*, vol. 39, n.º 3, págs. 241-259, 2011.

ASTROPARTÍCULAS

IceCube:



El telescopio de neutrinos más grande del mundo ha entrado en funcionamiento en el Polo Sur. Uno de sus objetivos consistirá en hallar pruebas de la existencia de materia oscura, la masa invisible del universo

Carlos Pérez de los Heros

Astrofísica desde el hielo

A la luz de la luna: El laboratorio de IceCube inmerso en la noche polar, de seis meses de duración.

FOTOGRAFÍA DE EMANUEL JACOBI/NSF

EN SÍNTESIS

Los neutrinos apenas interaccionan con la materia, por lo que pueden recorrer grandes distancias cósmicas sin ser absorbidos. Un telescopio de neutrinos permite «ver» fenómenos imposibles de observar con un telescopio óptico.

Con un volumen de detección que abarca un kilómetro cúbico, IceCube es el mayor detector de neutrinos del mundo. Sus 5160 módulos ópticos se encuentran sumergidos en el hielo del Polo Sur, junto a la base Amundsen-Scott.

IceCube detecta neutrinos procedentes de los fenómenos más violentos del universo. También participa en la búsqueda de materia oscura, la misteriosa sustancia invisible que compone la mayor parte de la masa del universo.

Carlos Pérez de los Heros es profesor del departamento de física y astronomía de la Universidad de Uppsala e investigador en el proyecto IceCube, donde dirige el grupo de búsqueda de materia oscura.



«Dios todopoderoso, este lugar es horrible», escribió el oficial Robert Falcon Scott al llegar al Polo Sur, el 17 de enero de 1912. Tras dos meses y medio de penosa travesía desde la costa antártica, Scott y sus hombres hubieron de resignarse a encontrar allí la bandera noruega que la expedición de Roald Amundsen había izado un mes antes. Cien años después de aquella odisea, la base polar Amundsen-Scott se ha convertido en un centro científico que hospeda varios proyectos astrofísicos de envergadura. Entre ellos, IceCube, un telescopio de neutrinos de un kilómetro cúbico de tamaño.

Con una temperatura media de 30 grados Celsius bajo cero en verano, inaccesible y en noche perpetua durante los seis meses de invierno, el Polo Sur tal vez no parezca el lugar más idóneo para construir un detector de neutrinos. Añádanse a tales condiciones unas comunicaciones precarias —debido a que la mayoría de los satélites describen órbitas cuasiecuatoriales, no polares— y el hecho de que todo cargamento debe ser transportado en avión ante la imposibilidad de hacerlo por tierra, y la logística necesaria para erigir un proyecto del calibre de IceCube adquiere proporciones descomunales. Sin embargo, decenas de científicos de varios países hemos dedicado más de una década a diseñar y construir IceCube precisamente allí, en el Polo Sur geográfico. ¿Qué convierte al lugar más frío y seco del planeta en un emplazamiento tan especial para la física de neutrinos?

Para responder a esa pregunta debemos repasar brevemente la historia del descubrimiento del neutrino. Hacia los años treinta del siglo xx, numerosos experimentos parecían indicar que ciertas desintegraciones radiactivas violaban el principio de conservación de la energía: la masa del núcleo resultante más la energía de las partículas emitidas era inferior a la masa del núcleo original. Aunque la conservación de la energía constituye uno de los pilares fundamentales de toda teoría física, en aquella época solo había sido verificada empíricamente en fenómenos macroscópicos. ¿Podía ocurrir que en algunos procesos del micromundo la energía no se conservase? Físicos de la talla de Niels Bohr llegaron a especular sobre semejante posibilidad.

Pero, en 1930, Wolfgang Pauli, por entonces profesor de física en el Instituto Politécnico de Zúrich, propuso una elegante solución al problema. Según esta, la energía sí se conservaba en los procesos microscópicos; sin embargo, en las desintegraciones observadas se emitía una partícula neutra y sin masa que, como tal, no podía ser detectada por los aparatos al uso. Dicha partícula, que más tarde recibiría el nombre de neutrino, portaría la energía que faltaba para ajustar los cálculos. Pero, para que tal solución fuera viable, la probabilidad de que un neutrino interaccionase con la materia ordinaria debía resultar extremadamente pequeña. Ello lo convertía en una partícula muy difícil de detectar.

Hubieron de transcurrir más de 25 años para comprobar que la propuesta de Pauli era correcta; así de esquivo es el neutrino. A finales de 1955, Frederick Reines y Clyde Cowan, del Laboratorio Nacional de Los Álamos, llevaron a cabo un ingenioso experimento en las cercanías de un reactor nuclear. Según la hipótesis de Pauli, una central nuclear debería emitir un intenso flujo de neutrinos (en realidad, antineutrinos), procedentes de la desintegración de los núcleos inestables generados en la fisión del combustible. Para detectarlos, Reines y Cowan llenaron un tanque con una mezcla de agua y líquido centelleador, lo rodearon de fotomultiplicadores y lo emplazaron a once metros del núcleo del reactor. La interacción de un antineutrino con uno de los protones de las moléculas de agua debía producir un neutrón y un positrón; un proceso similar a la desintegración beta del neutrón, pero en sentido inverso. Inmediatamente después, el positrón entraría en contacto con uno de los electrones del agua, por lo que ambas partículas se aniquilarían y se convertirían en rayos gamma (radiación electromagnética de alta energía). Por último, estos provocarían la emisión de destellos de luz en el líquido centelleador, los cuales serían detectados por los fotomultiplicadores.

El experimento de Reines y Cowan dio sus frutos. Poco después, los investigadores mejoraron el diseño original para detectar asimismo el neutrón emitido en la interacción; pero el resultado quedó claro desde el principio: se estaba observando un flujo de neutrinos, ya que existía una diferencia notable en el número de reacciones detectadas cuando el reactor estaba encendido y cuando se encontraba apagado. Además, el cálculo de la probabilidad de interacción concordaba con lo que cabía esperar a partir de las características físicas propuestas para el neutrino.

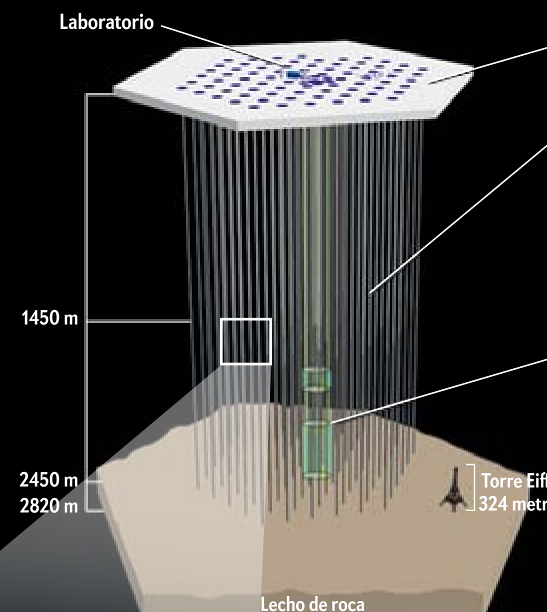
Hoy sabemos que los neutrinos son partículas elementales (sin subestructura conocida), carentes de carga eléctrica y que únicamente experimentan la atracción gravitatoria y la interacción nuclear débil. Esta última, responsable de las desintegraciones de los elementos inestables de la tabla periódica, es unas 10.000 veces menos intensa que la interacción electromagnética, lo cual explica que los neutrinos resulten tan difíciles de detectar. Existen tres tipos de neutrinos: el neutrino electrónico, el muónico y el tauónico. Estas especies solo se diferencian en el valor de su masa, que, aunque extremadamente pequeña, no es nula, como en un principio había supuesto Pauli. La física de neutrinos ha desempeñado un papel fundamental para ayudarnos a entender las interacciones entre partículas elementales y la evolución del universo joven, desde la gran explosión hasta la formación de las primeras macroes-

Un kilómetro cúbico de hielo para detectar neutrinos

Los neutrinos son partículas elementales carentes de carga eléctrica y que apenas interaccionan con la materia. Se espera que sean generados en gran cantidad de fenómenos astrofísicos, como las explosiones de rayos gamma o en las emisiones de agujeros negros supermasivos. Constituyen excelentes mensajeros astronómicos, ya que pueden recorrer enormes distancias cósmicas sin ser absorbidos por el camino. Sin embargo, resultan extremadamente difíciles de detectar, por lo que para observarlos es necesario construir dispositivos gigantescos.

El telescopio de neutrinos IceCube (*abajo*), en el Polo Sur, consta de miles de módulos ópticos enterrados bajo el hielo. Su volumen de detección abarca un kilómetro cúbico, lo que lo convierte en el primer observatorio capaz de detectar neutrinos de muy alta energía.

IceCube consta de 86 agujeros de profundidad kilométrica excavados en el hielo del Polo Sur, cada uno de los cuales alberga 60 módulos ópticos espaciados a distancias regulares.



Detectores de superficie (IceTop): 81 estaciones y 324 módulos ópticos
Detectan las partículas secundarias generadas por los rayos cósmicos que alcanzan la atmósfera.

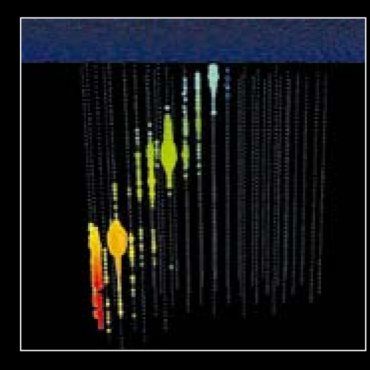
Detectores subterráneos: 86 columnas y 5160 módulos ópticos (incluidos los del núcleo denso)
Detectan las partículas secundarias emitidas cuando un neutrino cósmico interacciona con el hielo. La separación entre columnas (125 metros) determina la energía mínima que debe poseer el neutrino para poder ser detectado (unos 100 gigaelectronvoltios, o GeV).

Núcleo denso: 8 columnas y 480 módulos ópticos
Conjunto de columnas más próximas entre sí (40 metros) para detectar neutrinos de menor energía (20 GeV o más).

Interacción con una molécula de agua
Muon
Neutrino incidente

Detección de la luz de Cherenkov

Aunque ocurre con muy poca probabilidad, cuando un neutrino interacciona con una de las moléculas de agua del hielo se produce una emisión de partículas secundarias, como muones. Si la velocidad de estos supera a la de la luz en el hielo, se emite un frente de onda electromagnético conocido como luz de Cherenkov (*cono azul*). Gracias a la gran transparencia del hielo antártico, dicha radiación puede ser detectada por los módulos ópticos (*esferas*).



Reconstrucción de la trayectoria del neutrino

A partir de la luz de Cherenkov emitida por las partículas secundarias, los sistemas informáticos reconstruyen la energía y la trayectoria del neutrino incidente. La imagen muestra la traza generada por un muon al atravesar IceCube. El tamaño y el color de cada burbuja representan la cantidad de luz detectada y el tiempo relativo de cada señal (los tonos rojizos indican el inicio de la trayectoria; los azules, los instantes posteriores).

DANIELLE VEVEA, JAMIE YANG/NSF (*diagrama de IceCube*); CARLOS PÉREZ DE LOS HEROS (*módulos y luz de Cherenkov*); WWW.ICECUBE.WISC.EDU (*reconstrucción informática*)

tructuras. Sin neutrinos, el cosmos sería un lugar muy distinto del que conocemos.

MENSAJEROS DEL UNIVERSO LEJANO

Sin embargo, la misma propiedad que hace que los neutrinos resulten tan difíciles de detectar los convierte en incomparables mensajeros astronómicos. Dado que apenas interaccionan con la materia, estas partículas no solo escapan con facilidad de cualquier cuerpo celeste en el que hayan sido generadas, sino que pueden recorrer enormes distancias cósmicas sin ser absorbidas en el camino. Los fotones interaccionan con mucha mayor probabilidad con todo tipo de materia, por lo que numerosos objetos astronómicos resultan opacos al paso de la luz. Un «telescopio de neutrinos», en cambio, nos permitiría «ver» más allá que cualquier telescopio óptico.

Las primeras ideas para escudriñar el cielo en busca de neutrinos fueron propuestas en los años sesenta. Su objetivo consistía en estudiar algunos de los fenómenos más violentos del universo, como los núcleos activos de galaxias o las explosiones de rayos gamma. En ellos, los neutrinos no son generados en desintegraciones radiactivas, sino a partir de haces de materia acelerada y eyectada a enormes velocidades. Los neutrinos así producidos pueden poseer cualquier energía; en particular, varios órdenes de magnitud superior a la de los neutrinos procedentes de las desintegraciones nucleares, de unos pocos megaelectronvoltios (MeV).

Esos mismos procesos cósmicos emiten también radiación electromagnética de muy alta energía, por lo que los flujos de neutrinos y rayos gamma se encuentran correlacionados. Así, a partir de algunos de los parámetros que caracterizan una galaxia activa o una explosión de rayos gamma, pueden derivarse límites sobre el flujo de neutrinos que debería llegar hasta la Tierra. Este resulta ser muy débil: no más de unos pocos neutrinos por kilómetro cuadrado al año. En consecuencia, hacer astrofísica de neutrinos requiere emplear dispositivos gigantescos.

Ya en la década de los setenta quedó claro que se necesitarían detectores de un kilómetro cúbico de tamaño; un reto que superaba con creces las posibilidades técnicas de la época. Tres decenios después, ha sido el esfuerzo conjunto de más de 300 científicos de 40 universidades y laboratorios de EE.UU., Alemania, Suecia, Bélgica, Canadá, Japón, Nueva Zelanda, Suiza y el Reino Unido lo que ha hecho posible IceCube, el primer telescopio de neutrinos de altas energías de un kilómetro cúbico de tamaño.

La detección de neutrinos con energías del orden del gigaelectronvoltio (GeV) o superiores se realiza por métodos indirectos basados en la luz de Cherenkov. Esta radiación es emitida cuando una partícula con carga eléctrica atraviesa un material a una velocidad mayor que la de la luz en dicho medio. Aunque la velocidad de la luz es máxima en el vacío, en el interior de un medio óptico su propagación se ralentiza debido a las continuas interacciones entre los fotones y los átomos del material. Por tanto, en el seno de un medio sí puede ocurrir que algunas partículas muy energéticas se desplacen más rápido que la luz. En tal caso, la radiación de Cherenkov surge como consecuencia del frente de onda producido por el reordenamiento instantáneo de los átomos del material al paso de una partícula dotada de carga eléctrica (un fenómeno similar al que tiene lugar con las ondas de presión cuando un avión rompe la barrera del sonido).

Aunque ocurre con muy poca probabilidad, cuando un neutrino interacciona con un átomo se producen varias partículas secundarias como consecuencia del choque. Si se trata de un neutrino muónico, una de ellas será un muon (una partícula elemental con la misma carga que el electrón, pero unas 200 veces más masiva). En los casos en los que el neutrino incidente posee una energía muy elevada, el muon sale despedido en una dirección muy similar a la de aquel. Por tanto, si somos capaces de reconstruir la trayectoria del muon, podremos «apuntar» hacia la dirección del cielo desde la que llegó el neutrino; es decir, podremos hacer astrofísica. La detección de los muones se realiza a partir de la radiación de Cherenkov que estos emiten, la cual es registrada por una serie de fotomultiplicadores posicionados de la manera adecuada. Por supuesto, todo el proceso ha de transcurrir en el seno de un material transparente que permita que la luz de Cherenkov llegue hasta los fotomultiplicadores.

Si se trata de neutrinos electrónicos o tauónicos, las partículas producidas en la colisión serán un electrón o una partícula tau (una versión pesada del muon). Aunque estos también emiten radiación de Cherenkov, la traza que dejan en los detectores resulta demasiado corta para reconstruir con fiabilidad la trayectoria del neutrino incidente. Ello se debe a que los electrones pierden energía con gran rapidez; los tauones, por su parte, poseen una vida media muy breve (del orden de 10^{-15} segundos) y se desintegran con gran rapidez en otras partículas. Aunque en IceCube hemos desarrollado técnicas para analizar las trazas que los neutrinos electrónicos y tauónicos generan en las proximidades del detector, en lo que sigue nos ceñiremos a la detección de neutrinos muónicos.

Los primeros observatorios de neutrinos de gran tamaño, como el detector Irvine-Michigan-Brookhaven (IMB, en Michigan) o el japonés Kamiokande, ambos ya fuera de servicio, constaban de enormes tanques llenos de varias toneladas de agua purificada y rodeados de fotomultiplicadores. Esos detectores se emplazaron en grandes cavernas, perforadas ex profeso para protegerlos de los muones atmosféricos. Estos muones, generados en la atmósfera terrestre debido al continuo bombardeo de los rayos cósmicos, resultan indistinguibles de los muones producidos a partir de la interacción con un neutrino, por lo que uno de los objetivos principales a la hora de construir un detector de neutrinos consiste en reducir su exposición a los muones atmosféricos. Sin embargo, la construcción de observatorios en minas subterráneas o en túneles bajo montañas impone serias limitaciones al tamaño del dispositivo. El mayor observatorio de neutrinos construido en una caverna excavada a tal efecto es el detector Super-Kamiokande, en Japón. Este consta de un recipiente cilíndrico de acero, de 39 metros de diámetro por 42 de alto, que aloja 50.000 toneladas de agua ultrapura. A pesar de que lleva 16 años funcionando de manera satisfactoria, su tamaño restringe la clase de observaciones que pueden efectuarse, ya que no basta para detectar neutrinos de altas energías.

NEUTRINOS BAJO EL HIELO

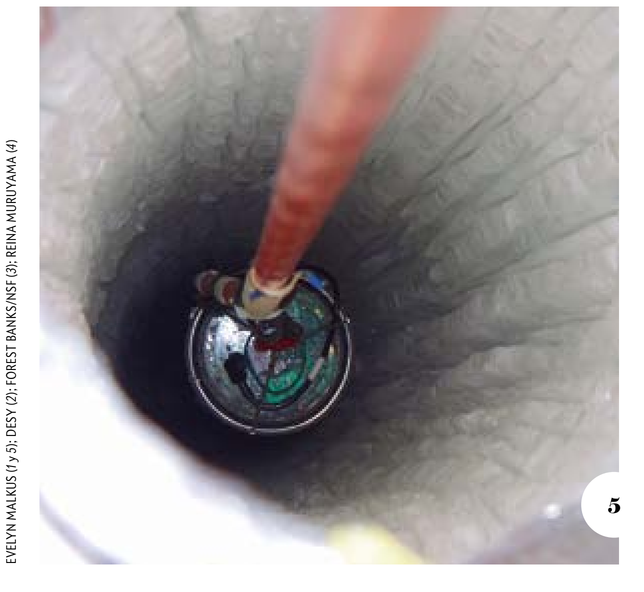
Excavar un kilómetro cúbico de roca resulta sencillamente imposible. Esta dificultad nos trae de nuevo al Polo Sur y al innovador diseño de IceCube: en vez de llenar un tanque con agua, se emplea el hielo de la Antártida como material transparente. A tal fin se han perforado varios agujeros de profundidad kilométrica, espaciados a intervalos regulares y en cuyo interior se han dispuesto varios módulos ópticos. Ello permite abarcar un volumen de detección de un kilómetro cúbico sin tener que cavar un nicho de tales dimensiones. El grosor del glaciar del Polo Sur asciende a unos 2800 metros. Salvo en otras regiones de la Antártida y en Groenlandia, no existe en la Tierra ninguna otra capa de hielo de espesor semejante.











Durante la construcción de IceCube, entre 2005 y finales de 2010, se excavaron 86 agujeros de 60 centímetros de diámetro y unos 2500 metros de profundidad para instalar en ellos más de 5000 módulos ópticos. Vista aérea del campamento de perforación de IceCube (*1*). Tres módulos ópticos listos para las últimas pruebas de laboratorio antes de ser enviados al Polo Sur (*2*). Un avión Hércules LC130 con esquíes descargando parte del equipo de perforación (*3*). Un módulo óptico se fija al cable principal, momentos antes de ser enviado a las profundidades (*4*). Comienzo de un viaje de 2000 metros hacia el interior del hielo antártico (*5*).

EVELYN MALKUS (1 y 5); DESY (2); FOREST BANKS/NSF (3); REINA MURUYAMA (4)

Además, debido a las grandes presiones que reinan a esas profundidades, el aire que en circunstancias normales habría quedado atrapado en forma de burbujas microscópicas dispersas (las mismas que confieren a los cubitos de nuestros congeladores un aspecto blanquecino) ha acabado fusionado en la estructura cristalina del hielo. En consecuencia, el hielo de la Antártida constituye uno de los materiales más transparentes que se conocen. Estas circunstancias convierten al Polo Sur en un lugar idóneo para construir un telescopio de neutrinos: allí disponemos de un material muy transparente que permite que la luz de Cherenkov se propague sin problemas, con el grosor adecuado para enterrar el detector y reducir el flujo de muones atmosféricos, y cerca de una base científica en la que instalar la infraestructura necesaria.

Debido a su diseño, IceCube no es un detector compacto, sino que consta de una serie de módulos ópticos que conforman una red tridimensional. Cada módulo cuenta con un fotomultiplicador acoplado a los instrumentos electrónicos necesarios para leer la señal, todo ello protegido por una esfera de cristal de 50 centímetros de diámetro. Estos dispositivos se hallan conectados al laboratorio por medio de un cable que proporciona los 1400 voltios necesarios para su funcionamiento, al tiempo que transmite las señales del fotomultiplicador a los ordenadores encargados de reconstruir la trayectoria del muon.

Cada módulo óptico registra el instante en que detecta un destello de luz de Cherenkov. Para ello, los módulos se calibran desde la superficie, a fin de mantener una sincronización continua entre su reloj interno y un sistema GPS matriz con una precisión de una milmillonésima de segundo. Al conocer la localización de cada módulo y el instante en que se detecta una señal, los equipos informáticos reconstruyen la trayectoria del muon y, a partir de ella, deducen la dirección del neutrino incidente. Dado que, dependiendo de su energía, los muones pueden atravesar desde decenas hasta miles de metros de hielo, IceCube puede detectar neutrinos en un intervalo de energías muy amplio, desde algunas decenas de GeV hasta el petaelectronvoltio (un millón de GeV).

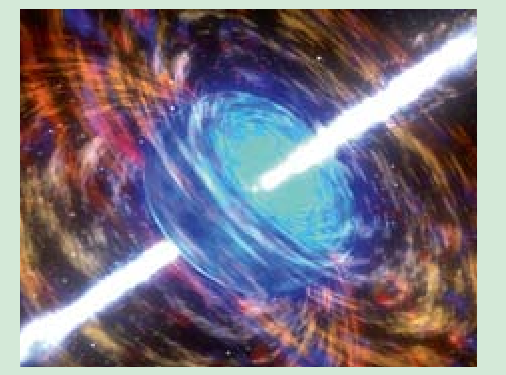
Durante la construcción de IceCube se excavaron decenas de agujeros de 60 centímetros de diámetro y 2450 metros de profundidad. Para derretir el hielo se empleó agua a 90 grados, inyectada a presión a través de una manguera que proporcionaba 760 litros por minuto. Cada agujero tardó en perforarse unas

EXPERIMENTOS

Pero... ¿dónde están los neutrinos?

Las explosiones de rayos gamma (GRB, por sus siglas en inglés) constituyen uno de los procesos más violentos que se conocen en el universo. En apenas unos segundos, pueden emitir una cantidad de energía equivalente a la que radiará el Sol durante toda su vida. Se han observado explosiones de este tipo en galaxias lejanas distribuidas de manera uniforme por todo el cielo. De media, desde la Tierra se detecta una GRB al día. Aunque tal vez parezca una frecuencia elevada, corresponde a una explosión cada millón de años en una galaxia típica.

El origen de tales explosiones plantea serios problemas, ya que resulta muy difícil imaginar procesos que liberen una cantidad de energía semejante en tan poco tiempo. Uno de los modelos más populares es el denominado «bola de fuego»; un nombre que no debe interpretarse de manera literal. Este postula la existencia de un sistema inicial que, dotado de una enorme densidad de materia y energía, se expande a velocidades cercanas a la de la luz. Aunque su naturaleza dista mucho de estar clara (como posibles candidatos se barajan desde explosiones de hipernovas hasta colisiones entre agujeros negros y estrellas de neutrones), un sistema de tales características podría radiar grandes cantidades de rayos gamma.



Recreación artística de una explosión de rayos gamma.

Además, la materia en expansión emitiría también protones de muy alta energía, lo cual explicaría asimismo el origen de los rayos cósmicos más energéticos detectados hasta la fecha. Los rayos cósmicos se componen de partículas procedentes del espacio exterior que alcanzan la atmósfera terrestre. Con energías que en ocasiones llegan a superar el exaelectronvoltio (10^9 GeV, un millón de veces superiores a las alcanzadas en el Gran Colisionador de Hadrones del CERN), su procedencia continúa planteando un enigma.

¿Podría el modelo de bola de fuego explicar a un tiempo las explosiones de rayos gamma y la procedencia de los rayos cósmicos más energéticos? Según dicha hipótesis, la materia acelerada durante la explosión debería interaccionar entre sí y provocar una cascada de reacciones en las que se generarían piones, muones y neutrinos. Por tanto, las explosiones de rayos gamma deberían ir acompañadas de la emisión de neutrinos de alta energía. El año pasado, IceCube se unió a los esfuerzos internacionales para entender tales fenómenos.

A partir de datos tomados entre abril de 2008 y mayo de 2010 (cuando la construcción del detector aún no se había completado), IceCube llevó a cabo una búsqueda de neutrinos en coincidencia espaciotemporal con 307 GRB detectadas durante dicho período. No se halló ningún flujo anómalo sobre el esperado debido a los neutrinos atmosféricos, lo cual permitió imponer límites bastante estrictos sobre algunos de los parámetros libres que caracterizan al modelo de bola de fuego. Según nuestros resultados, o bien los protones emitidos durante una GRB no bastan para dar cuenta del flujo de rayos cósmicos de alta energía, o bien las suposiciones del modelo que predicen una emisión de neutrinos deben ser revisadas. En estos momentos estamos analizando nuevos datos, tomados ya con la configuración definitiva del detector.

Al recibir el premio Nobel de física en 1936, Victor Hess, considerado el descubridor de los rayos cósmicos, puso énfasis en que, para progresar en el estudio de estos, sería necesario emplear «todos nuestros recursos y aparatos de manera simultánea». Más de 75 años después, el origen de los rayos cósmicos continúa siendo un misterio, pero sin duda estamos aplicando todos los medios a nuestro alcance para resolverlo.

NASA

35 horas. Después, en cada uno de ellos se insertó un cable con 60 módulos ópticos, separados entre sí por una distancia vertical de 17 metros; una operación de unas 10 horas de trabajo. Al cabo de unos días, el agua derretida volvió a congelarse, tras lo cual el cable y los módulos ópticos quedaron fijos.

Mediante varios sensores de presión sumergidos con cada cable, puede conocerse la profundidad a la que ha quedado enterrado cada uno de los módulos ópticos. Dado que la posición del cable sobre la superficie es conocida, ello permite determinar las tres coordenadas espaciales de cada módulo con una precisión de centímetros; una condición imprescindible para reconstruir con fiabilidad la trayectoria de los muones. IceCube consta de 86 columnas de módulos ópticos, separadas por una distancia típica de 125 metros. En total, se han enterrado 5160 módulos a una profundidad de entre 1450 y 2450 metros. Dado que, una vez colocados, los módulos no pueden recuperarse para ser reparados o sustituidos, su diseño debe ser simple y robusto. Los módulos ópticos de IceCube fueron construidos para aguantar un mínimo de 20 años en las condiciones extremas del hielo profundo. La esfera de cristal que rodea cada uno de ellos presenta un grosor de tres centímetros, puesto que debe soportar presiones de hasta 600 atmósferas.

La construcción de IceCube comenzó en 2005 y se extendió hasta diciembre de 2010. Se necesitaron 181 vuelos en aviones Hércules LC130 para transportar unas 10.000 toneladas de material hasta la base Amundsen-Scott. A ella solo puede accederse entre mediados de octubre y febrero, cuando las condiciones atmosféricas permiten mantener vuelos diarios con la estación de McMurdo, situada en la costa del mar de Ross, a 1300 kilómetros de distancia. A fin de perforar el máximo número de agujeros durante esos cuatro meses y acelerar el proyecto, se instaló una central eléctrica de 5 megavatios de potencia. Como el lector puede imaginar, trabajar a temperaturas de entre 30 y 40 grados bajo cero y a una altitud de unos 3000 metros añade dificultades de todo tipo, tanto fisiológicas y humanas como en lo que respecta al comportamiento de los materiales y la maquinaria.

El hecho de que IceCube haya sido construido para explorar el cielo constituye su única similitud con un telescopio tradicional. Una de las diferencias más llamativas reside en que IceCube mira «hacia abajo»; es decir, hacia el centro de la Tierra. Ello se debe a que, incluso a las profundidades a las que se encuentran los módulos ópticos, aún llegan muones atmosféricos a través del hielo, por lo que IceCube utiliza la Tierra como filtro. Gracias a los programas informáticos adecuados, se registran solo los muones que cruzan el detector «desde abajo». Dado que las únicas partículas que pueden atravesar el planeta son los neutrinos, un muon que llegue al detector desde la dirección del horizonte o con un ángulo mayor solo puede proceder de un neutrino que atravesó la Tierra e interaccionó en la vecindad del detector. Por tanto, al estar localizado en el Polo Sur, IceCube explora el cielo del hemisferio norte. En fecha reciente se han desarrollado métodos para filtrar los datos procedentes de muones atmosféricos, lo cual ha hecho de IceCube un detector adecuado para estudiar todo el cielo. Dichas técnicas se basan en rechazar los muones que llegan al detector, pero que han sido producidos fuera de su volumen. Estos, sin embargo, pueden incluir tanto muones atmosféricos como otros generados por neutrinos de alta energía, por lo que, al excluir todos ellos, el intervalo de energías al cual el experimento es sensible se ve reducido para aquellos neutrinos provenientes del hemisferio sur celeste.

IceCube no puede apuntar en una dirección del cielo determinada, sino que gira con la Tierra. No obstante, a diferencia de los telescopios tradicionales, IceCube nos permite examinar todo el cielo de forma continua, ya que puede detectar neutrinos procedentes de cualquier dirección en todo momento. Los programas informáticos que analizan sin cesar las señales registradas por los módulos ópticos extraen la dirección de cada uno de los muones que atraviesan el detector. A tal fin, 300 ordenadores situados en el laboratorio de IceCube, en la base Amundsen-Scott, realizan un análisis preliminar de las señales procedentes de los módulos ópticos y los datos de calibración del detector, lo que supone unos 700 gigaoctetos de información al día. Después esos datos se filtran, tratando de conservar los sucesos que se consideran más interesantes, como aquellos que corresponden a una región del cielo de particular interés o a una energía determinada. La cantidad de información se reduce así a unos 100 gigaoctetos al día, los cuales se transmiten por satélite a un centro de análisis de datos en Madison, en Estados Unidos. Desde allí, los datos se ponen a disposición de todos los miembros de la colaboración para proceder a un estudio más exhaustivo.

CIELOS OSCUROS

En un principio, IceCube fue concebido para escudriñar el cielo en busca de neutrinos de alta energía y estudiar con ellos los objetos más lejanos del universo. Sin embargo, puede también emplearse para estudiar la materia oscura, la misteriosa sustancia que hoy sabemos que constituye el 85 por ciento de toda la materia que existe en el universo.

Los primeros indicios relativos a la existencia de un tipo de materia invisible datan de los años treinta del siglo xx, cuando dos estudios independientes mostraron la universalidad del problema. El primero de ellos, realizado en 1932 por el astrónomo holandés Jan Oort, analizó la velocidad de rotación de las estrellas en los brazos exteriores de la Vía Láctea. El segundo, efectuado por el suizo Fritz Zwicky un año después, estudió la velocidad de las galaxias del cúmulo de Coma, un grupo de unas mil galaxias localizadas a 320 millones de años luz de la Tierra. En ambos casos, la conclusión fue idéntica: ni las estrellas de la Vía Láctea ni las galaxias del cúmulo de Coma se movían como cabría esperar a partir de la atracción gravitatoria ejercida por la masa observada en esos sistemas. De hecho, numerosas estrellas de las observadas por Oort presentaban velocidades tan elevadas que hubieran debido salir despedidas de la Vía Láctea. Fue Zwicky quien acuñó el término «materia oscura» para referirse a esa materia invisible pero necesaria para explicar las observaciones. Hoy contamos con pruebas que apuntan a la existencia de materia oscura en todas las galaxias estudiadas y también en el medio intergaláctico. Pero, si bien los datos se muestran robustos y han sido obtenidos por métodos independientes y a escalas muy distintas, la naturaleza de la materia oscura continúa siendo un misterio.

El problema principal reside en que no puede tratarse de materia ordinaria en forma de nubes de gas frío, planetas o estrellas muertas (enanas marrones, estrellas de neutrones o agujeros negros). Tales objetos se componen, en esencia, de protones, neutrones y electrones. Sin embargo, hoy sabemos que el número de partículas de ese tipo que fueron creadas durante la gran explosión no bastan para dar cuenta de toda la materia oscura observada en el universo. Su cantidad puede calcularse a partir de las abundancias de hidrógeno, helio y deuterio primordiales, medidas con gran precisión a lo largo de la última década. Esos resultados muestran que, si toda la materia oscura se compusiese de partículas ordinarias, el universo no sería tal y como lo observamos hoy. En tal caso, sus prime-

ros estadios se habrían caracterizado por una densidad mucho mayor. Dado que la eficiencia de una reacción nuclear depende de la temperatura y densidad del plasma, la síntesis de elementos ligeros habría transcurrido con mayor rapidez y sus cantidades relativas diferirían mucho de las observadas en la actualidad. Por tanto, resulta imposible suponer que en el universo primigenio se creó una cantidad adicional considerable de protones y neutrones sin vernos obligados a extraer conclusiones irreconciliables con su estructura actual.

La hipótesis adoptada por la mayoría de los físicos consiste en suponer que la materia oscura se encuentra formada por un tipo de partícula aún desconocida. Aunque todavía no hemos logrado detectarla, resulta posible deducir varias de sus propiedades: no puede experimentar los efectos de la interacción electromagnética (es decir, ha de ser neutra, ya que de lo contrario podría emitir o absorber fotones), debe interaccionar muy débilmente con la materia ordinaria y, a fin de dar cuenta de los efectos gravitatorios observados, su masa ha de ser elevada, entre decenas o centenares de veces mayor que la masa del protón [*véase* «Mundos oscuros», por Jonathan Feng y Mark Trodden; Investigación y Ciencia, enero de 2011].

Dichas partículas reciben el nombre genérico de WIMP, siglas inglesas de «partículas masivas que interaccionan débilmente». Se cree que tales partículas serían estables y que habrían sido creadas en grandes cantidades durante la gran explosión que dio origen a nuestro universo. Más tarde se habrían agregado en cúmulos, a partir de los cuales se gestaron, por atracción gravitatoria, las galaxias que hoy pueblan el cosmos. Según este modelo, las WIMP formarían hoy grandes halos, invisibles pero muy masivos, que afectarían al movimiento de las galaxias y a la materia visible. Sin embargo, dado que interaccionan muy débilmente con las partículas ordinarias, no habrían alterado la evolución del universo primitivo ni las reacciones nucleares en las que se sintetizaron los elementos ligeros.

Aunque elegante, una solución de este tipo podría considerarse demasiado ad hoc como para otorgarle relevancia científica. Al fin y al cabo, se limita a desviar el problema de entender el origen de la materia oscura al de detectar una nueva partícula elemental que, por lo demás, no desempeñaría ninguna otra función en la estructura general del cosmos. En cierto modo, nos encontramos en una situación muy similar a aquella en la que se encontraba Pauli hace ochenta años: la necesidad de postular la existencia de una partícula casi imposible de detectar para salir de un atolladero experimental.

LA FÍSICA DE PARTÍCULAS AL RESCATE

Sin embargo, aquí la física de partículas acude en nuestro auxilio por medio de una vía inesperada: ciertas teorías que tratan de generalizar el modelo estándar de las interacciones fundamentales predicen la existencia de partículas de tipo WIMP, una aparente coincidencia que ha dado en llamarse «milagro WIMP». Así pues, algunas de las nuevas partículas que los físicos teóricos necesitan para completar su descripción del micromundo reúnen las características necesarias para resolver uno de los problemas más acuciantes del macrocosmos, la materia oscura. Una casualidad difícil de ignorar.

DETECCIÓN DE WIMP

Neutrinos y materia oscura

Hoy sabemos que en torno al 85 por ciento de toda la materia existente en el universo es materia oscura: una misteriosa sustancia que no absorbe ni emite luz, y cuyo único efecto observable consiste en el poderoso arrastre gravitatorio que ejerce sobre estrellas y galaxias. Se cree que los gigantescos halos de materia oscura que envuelven a las galaxias se componen de un gas de partículas elementales aún por descubrir.

Las partículas de materia oscura poseerían una gran masa, carecerían de carga eléctrica y solo experimentarían los efectos de la interacción débil. Reciben el nombre genérico de WIMP, siglas inglesas de «partículas masivas que interaccionan débilmente». IceCube se ha unido a los esfuerzos internacionales para detectar indicios de su existencia y desentrañar su naturaleza.

Sol

WIMP

Debido a la atracción gravitatoria, las WIMP formarían agregados más densos en aquellas regiones que contienen una gran cantidad de materia ordinaria, como el centro galáctico, el interior del Sol o el centro de nuestro planeta.

Tierra

Neutrino

WIMP

Neutrino

IceCube

Varias propuestas teóricas predicen que las WIMP podrían ser su propia antipartícula, por lo que la colisión fortuita entre dos de ellas conduciría a su aniquilación. La energía liberada en ese proceso generaría una cascada de partículas de otras clases; entre ellas, neutrinos.

WIMP

WIMP

Neutrino

IceCube escudriña aquellas regiones en las que se espera que exista una mayor concentración de WIMP con el objetivo de detectar los neutrinos producidos en su posible desintegración. Por el momento, la búsqueda continúa.

JAN KUNNEN (*esquema Tierra-Sol*)

Aunque son varias las teorías que predicen la existencia de partículas de tipo WIMP, aquí solo mencionaremos dos. Una de ellas es la supersimetría, propuesta hace varios decenios para resolver ciertos problemas conceptuales del modelo estándar. A grandes rasgos, esta hipótesis implica duplicar el número de partículas elementales: por cada partícula conocida, la supersimetría predice la existencia de otra con la misma carga eléctrica y características similares, pero cuyo espín difiere en 1/2. Ninguna de esas partículas ha sido detectada todavía; por tanto, para que dicho esquema resulte compatible con los experimentos, las partículas supersimétricas deberían poseer una masa elevada y desintegrarse con gran rapidez. Así ocurriría con todas ellas, salvo con una: la más ligera de todas. La teoría predice que la partícula supersimétrica más ligera debe ser estable, neutra y con una masa comprendida entre unos pocos y miles de GeV; además, interaccionaría muy débilmente con la materia ordinaria. Justo las propiedades que se atribuyen a las WIMP.

Otras teorías que proporcionan una WIMP aceptable son aquellas que postulan la existencia de dimensiones suplementarias del espacio, adicionales a las tres que nos revela nuestra experiencia cotidiana. En caso de existir, esas dimensiones extra deberían poseer una longitud microscópica, ya que de lo contrario experimentaríamos sus efectos. Ello abre la posibilidad a que existan partículas que solo «viven» en esas dimensiones, pero que, al poseer masa, ejercen efectos gravitatorios sobre nuestras tres dimensiones habituales. Una de dichas partículas debe también ser estable y, por tanto, constituye una buena candidata a WIMP.

En vista de lo anterior, los halos de materia oscura de las galaxias estarían compuestos por un gas de WIMP. Dicho gas no se distribuiría de manera uniforme: por efecto de la atracción gravitatoria, cabe esperar una acumulación de WIMP en aquellas regiones de la galaxia que cuentan con una mayor densidad de materia ordinaria, como el centro galáctico. Un efecto parecido podría ocurrir también en el sistema solar; al fin y al cabo, el Sol constituye una concentración considerable de materia en una región que, por lo demás, se encuentra casi vacía (la estrella más cercana a nosotros, Proxima Centauri, se halla a 4,2 años luz de distancia). Algunas WIMP permanecerían atrapadas en órbitas alrededor del Sol y, al interaccionar con la materia ordinaria, perderían velocidad y quedarían confinadas en el interior del astro. A lo largo de los 4000 millones de años de vida del sistema solar, tales procesos habrían provocado la acumulación de cierta cantidad de materia oscura en el interior del Sol. Algo similar podría ocurrir también en el interior de los planetas más masivos; en particular, también en la Tierra.

En cualquier caso, ya sea en el centro galáctico, en el Sol o en el interior de nuestro planeta, una mayor concentración de WIMP incrementa la probabilidad de que dos de ellos colisionen entre sí. Y aquí nos encontramos con otro de los aspectos del milagro WIMP: en la mayoría de las teorías que predicen su existencia, partícula y antipartícula son idénticas, algo posible en el caso de partículas neutras. Por tanto, la colisión entre dos WIMP puede conducir a su aniquilación y la subsiguiente creación de partículas elementales de otras clases. Un gran número de ellas serían inestables y se desintegrarían inmediatamente en partículas de otro tipo; entre ellas, neutrinos. Esta posibilidad nos permite emplear un telescopio de neutrinos en la búsqueda de materia oscura.

Ese constituye precisamente uno de los objetivos que perseguimos en IceCube: «miramos» al Sol, al interior de la Tierra, al halo y al centro de la Vía Láctea en busca de un exceso de neutrinos sobre el flujo conocido de neutrinos atmosféricos. Hasta ahora no hemos detectado indicios de la aniquilación de WIMP. Sin embargo, tales resultados nulos revisten gran utilidad en física. Las teorías supersimétricas presentan un gran número de parámetros libres, lo cual se presta a escoger múltiples combinaciones, todas ellas válidas desde un punto de vista matemático. Por tanto, la única manera de discriminar entre ellas consiste en contrastar sus predicciones con los resultados experimentales. En nuestro caso, aquellos modelos que predigan que la cantidad de WIMP capturadas en el Sol produciría un flujo de neutrinos que no ha sido observado por IceCube pueden descartarse. Con todo, aún existen modelos que predicen un flujo demasiado exiguo como para que IceCube hubiera podido detectarlo en el corto tiempo que lleva tomando datos. Estos continuarán siendo válidos hasta que sus predicciones se vean descartadas por los experimentos: un claro ejemplo del método científico en funcionamiento.

En su configuración final, IceCube comenzó a tomar datos a finales de 2011, y se prevé que continúe haciéndolo durante al menos una década. En estos momentos se barajan varias ideas para extender el intervalo de energías a las que el detector es sensible. El umbral energético depende de la separación entre las columnas de módulos ópticos: son los 125 metros de distancia que median entre una y otra los que determinan la mínima energía detectable de un neutrino, que en estos momentos ronda los 100 GeV. Para reducir esa cota, 8 de las 86 columnas ya se han colocado a 40 metros de distancia. Aunque ocupan un volumen muy inferior a un kilómetro cúbico, ese núcleo de módulos ópticos, más denso, permite detectar neutrinos con energías de unos 20 GeV.

A fin de reducir aún más dicho umbral, se está estudiando la posibilidad de añadir unos 20 cables en el centro del detector, con una distancia mutua de 20 metros y una separación vertical entre módulos ópticos de apenas unos metros. Este subdetector, bautizado como PINGU (Precision IceCube Next Generation Upgrade) lograría detectar neutrinos con energías de hasta 1 GeV. Ello abriría las puertas a emplear el hielo de la Antártida para observar supernovas, medir las oscilaciones de neutrinos (la metamorfosis espontánea por la que un tipo de neutrino se transforma en otro durante su propagación), además de posibilitar la búsqueda de WIMP con masas inferiores a las que podemos detectar hoy.

Durante las próximas décadas, desde el desierto más seco, frío e inhóspito de la Tierra, los físicos continuaremos aprovechando el hielo de la Antártida para seguir acumulando estadística y entender mejor lo que los neutrinos pueden decirnos sobre el universo lejano y la materia oscura. La astrofísica de neutrinos no ha hecho más que empezar.

PARA SABER MÁS

Neutrinos para observar el cosmos. G. B. Gelmini, A. Kusenko y T. J. Weiler en *Investigación y Ciencia* n.º 406, julio de 2010.

Search for dark matter from the galactic halo with the IceCube Neutrino Telescope. Colaboración IceCube en *Physical Review D*, vol. 84, 022004, 29 de julio de 2011. Disponible en arxiv.org/abs/1101.3349

Multiyear search for dark matter annihilations in the Sun with the AMANDA-II and IceCube detectors. Colaboración IceCube en *Physical Review D*, vol. 85, 042002, 22 de febrero de 2012. Disponible en arxiv.org/abs/1112.1840

An absence of neutrinos associated with cosmic-ray acceleration in gamma-ray bursts. Colaboración IceCube en *Nature*, vol. 484, 19 de abril de 2012.

Página web del proyecto IceCube: **www.icecube.wisc.edu**

COMPORTAMIENTO ANIMAL

RISA DE RATA

Humanos aparte, ¿habrá otros animales con sentido del humor? Bien pudiera ser

Jesse Bering

Cierta vez, en somnoliento delirio a más de 10.000 metros sobre Islandia, quise recoger, palpando a ciegas por debajo de mi asiento, una tibia manta azul que allí asomaba. Descubrí, atónito y horrorizado, que le estaba dando recios tirones al robusto dedo gordo de un pie, metido en calcetín, que trataba de escabullirse. Con temperamentos como el mío, la vida tiende a convertirse en una serie de conversaciones poco felices y, en efecto, cuando me volví, sonriendo, para disculparme al propietario del dedo, mi mirada se tropezó con un hombretón, cuyos gruñidos parecían indicar que tenía cierta dificultad para verle la gracia al incidente.

Fue desagradable, cierto, pero en el fondo, una feliz chiripa. Al descansar de nuevo la cabeza sobre la almohadilla del asiento, protegida con ese papel sanitario de las líneas aéreas, en mi mente volandera afloró un recuerdo mucho más grato, también con dedo gordo, perteneciente este otro a un animalote mucho más jovial que el ocupante de atrás. Este otro dedazo —indistinguible, al tacto, de su rollizo homólogo humano— pertenecía a King, un gorila de 220 kilos y encías calcificadas, traído de las tierras bajas occidentales. Contando yo 20 años y King 27, pasé gran parte del verano de 1996 con mi desdentado amigo, escuchando a Frank Sinatra y a los Tres Tenores, jugando a perseguirnos por su recinto del zoo, haciéndole yo cosquillas en los dedos de los pies. King se tumbaba en su jaula nocturna, asomaba un enorme pie ceniciento por entre los barrotes, que dejaba colgando, pendulón, expectante. Cada vez que yo le agarraba un dedo del pie y se lo pellizcaba delicadamente, soltaba una erupción de risa gutural que le hacía estremecerse. Un día me incliné hacia su pie como si fuera a morderle su rechoncho dedo; casi no pudo controlarse. Si nunca ha visto un ataque de risa en un gorila, le recomiendo hacerlo antes de abandonar este mundo. Es algo que suscitaría interrogantes cognitivos, hasta en el antievolucionista más empedernido.

Además de los humanos, ¿habrá otros animales con sentido del humor? En ciertas formas, tal vez sí. Pero en otros sentidos, es probable que esas emociones sean de propiedad humana exclusiva. La verdad es que, anécdotas aparte, se sabe muy poco sobre la risa y el humor en los primates no humanos. Pero algunos de los hallazgos más notables que han ido aflorando en las ciencias comparadas, a lo largo de los últimos diez años, conciernen al inesperado descubrimiento de que las ratas —las crías, sobre todo— ríen. Ha leído bien: las ratas ríen. Tal es, al menos, el argumento que sostiene impávido

Adaptado de Why is the penis shaped like that?... And other reflections on being human, *de Jesse Bering. Por acuerdo entre Scientific American/ Farrar, Straus and Giroux, LLC. Copyright © 2012 Jesse Bering.*



ILUSTRACIÓN DE JONATHAN BARTLETT

el investigador Jaak Panksepp, autor de un notable artículo en *Behavioural Brain Research*, donde toma una posición que defiende con ardor.

El trabajo de Panksepp se ha centrado, en particular, sobre «la posibilidad de que nuestros animales experimentales más frecuentemente utilizados, los roedores de laboratorio, puedan experimentar episodios de tipo social-gozoso durante sus actividades lúdicas, y que un componente comunicativo-afectivo importante de ese proceso, que potencia la implicación social, constituya una forma primordial de risa». Ahora bien, antes que empiece el lector a imaginar risitas de un coqueto Stuart Little —pero, ¿no era un ratón?—, la auténtica risa de la rata no tiende a sonar como la variedad humana, que normalmente supone una serie de explosiones sonoras pulsantes; empiezan con una inhalación vocalizada y consisten en una serie de breves convulsiones bien delimitadas, separadas por intervalos de silencio de duración casi igual. El sonido típico de una risa humana es una *h* aspirada, seguida por una vocal, por lo general una *a*, debido, en gran parte, a que nuestra laringe es rica en armónicos. La risa de la rata, en contraste, se produce en forma de chillidos ultrasónicos de alta frecuencia, de unos 50 kilohercios (kHz), unos chirridos bien diferenciados de otras emisiones vocales de las ratas. He aquí cómo describe Panksepp su descubrimiento del fenómeno:

Apenas hube concluido el que tal vez sea el primer análisis etológico formal (i.e., bien controlado) de juegos espontáneos y anárquicos en la especie humana, a finales de los años noventa, en el cual la risa constituyó una respuesta abundante, tuve la «inspiración» (tal vez engañosa) de que la respuesta sonora observada en ratas que juegan pudiera tener relación ancestral con la risa humana. A la mañana siguiente, me dirigí al laboratorio y le indiqué a mi ayudante doctorando de entonces «venga conmigo a hacerles cosquillas a las ratas».

En los años siguientes, Panksepp y sus colaboradores efectuaron sistemáticamente un estudio tras otro sobre la risa en múridos, que revelaron una llamativa concordancia entre las características funcionales y expresivas de aquellos chillidos en roedores jóvenes y la risa de los niños. Para provocar la risa en sus crías experimentales, Panksepp se valió de una técnica que denominó «juego manual heteroespecífico», jerga que en esencia significa «hacer cosquillas».

Al parecer, las ratas las tienen, sobre todo, en la nuca, punto al que los individuos jóvenes orientan sus propias actividades lúdicas, como la conducta de inmovilización en la que una rata, a lomos de la otra, la retiene con firmeza. Panksepp no tardó en observar que las ratas más cosquillosas —lo que en términos empíricos solo significa ratas que, en manos humanas, emitían los más frecuentes, robustos y fiables chillidos de 50 kHz— eran también, entre las estudiadas, las espontáneamente más juguetonas de los múridos del ensayo. Y descubrió asimismo que la inducción de risa en ratas jóvenes suscitaba vínculos: las ratas cosquilleadas buscaban activa y específicamente las manos humanas que antes les hubieran hecho reír. Además, como sería de esperar en humanos, ciertos estímulos ambientales aversivos reducían de forma impresionante la risa en los roedores estudiados.

Por ejemplo, manteniendo constante el estímulo de cosquilleo, el chillido disminuía señaladamente cuando las crías captaban una vaharada de olor de gato, estaban muy hambrientas o quedaban expuestas a luces brillantes y molestas. Panksepp descubrió también que las hembras adultas se mostraban más receptivas a los cosquilleos que los machos, aunque, en general, resultaba difícil inducir cosquillas en animales adultos, «a menos que las hubieran sentido en abundancia de jóvenes». Por último, cuando a las crías se les permitía elegir entre dos adultos —uno que seguía con sus chillidos espontáneamente y otro, que no— pasaban un tiempo sustancialmente mayor con el adulto que parecía más feliz.

Tal vez no sorprenda que Panksepp encuentre resistencia a su interpretación de estos hallazgos, sobre todo, en la comunidad científica. Aun así, Panksepp protesta:

Hemos tratado una y otra vez de infirmar nuestra visión del fenómeno, y no lo hemos conseguido. Consecuentemente, nos sentimos, con cautela, justificados para presumir y cultivar empíricamente la posibilidad teórica de que exista algún tipo de relación ancestral entre los lúdicos chillidos de las crías de ratas y la risa infantil de los humanos.

Ahora bien, Panksepp sería el primero en reconocer que sus hallazgos no implican que las ratas tengan «sentido del humor», sino, únicamente, que parecen existir contigüidades evolutivas entre la risa de los pequeñines humanos en sus juegos espontáneos, y la expresión de vocalizaciones similares en ratas jóvenes. Un sentido del humor —sobre todo, del humor adulto— requiere mecanismos cognitivos que podrían, o no, existir en otras especies. No obstante, Panksepp conjetura que la cuestión sería empíricamente falsable. «Si un gato... hubiera representado una persistente y temible presencia en la vida de una rata, ¿sería posible que la rata emitiera algunos chillidos de felicidad si algo malo le ocurriera a su némesis? ¿Lo haría la rata si el gato cayera en una trampa o fuera bruscamente alzado en el aire, asido por la cola? Nosotros no recomendaríamos que se efectuasen experimentos tan malintencionados, pero sí animaríamos a quienes deseen tomar esa senda para que busquen métodos más benévolos para evaluar estas cuestiones».

Las diferencias entre los «sistemas jocundos» de los mamíferos se reflejan en las divergencias estructurales entre especies, tanto en las regiones cerebrales como en sus arquitecturas voca-

Jesse Bering es colaborador frecuente de nuestra revista y de *Slate* y *Das Magazin* (Suiza). Bering fue director del Instituto de Cognición y Cultura en la Universidad Queen's, Belfast.



EN SÍNTESIS

Experimentos recientes, de interpretación dudosa según algunos científicos, sugieren que las ratas ríen en forma de chillidos ultrasónicos de alta frecuencia. Se trataría de una risa provocada por cosquillas, nada que ver con un sentido del humor.

Otros estudios con humanos han demostrado que estos pueden captar la intención psicológica de una risa, basándose solo en las cualidades fonéticas del sonido.

les. En el mismo número de *Behavioural Brain Research*, el neuropsicólogo Martin Meyer y sus colegas describen con riqueza de detalles tales diferencias. Aunque los estudios de neuroimagen sobre voluntarios que están escuchando anécdotas cómicas o mirando chistes gráficos revelan la activación de estructuras evolutivamente ancestrales, como la amígdala y el núcleo accumbens, se excitan también estructuras de «nivel superior» y de evolución más reciente, entre ellas, regiones distribuidas de la corteza frontal. Así, aunque los primates no humanos rían, el humor de los humanos parece implicar redes cognitivas más especializadas, que no comparten otras especies.

En nuestra propia especie, la risa se desencadena instada por todo un repertorio de estímulos sociales; surge bajo un amplio tejaroz de emociones, no todas positivas. Por mencionar algunos de sus contextos, vemos risa asociada al gozo, al afecto, a lo divertido, a la alegría, la sorpresa, al nerviosismo, a la tristeza, al miedo, a la vergüenza, a la agresión, al triunfo, la mofa y el placer en la desgracia ajena (risa *schadenfreude*). Pero la risa, típicamente, constituye una señal social cargada de emotividad, en presencia de otros, lo que ha llevado a Diana Szameitat y su equipo a explorar la posible función adaptativa de la risa humana. Su estudio, publicado en *Emotion*, proporciona las primeras pruebas experimentales que demuestran que los seres humanos poseen una asombrosa capacidad para captar la intención psicológica de una risa, basándose solo en las cualidades fonéticas de su sonido. Y en ocasiones, señalan los autores, la risa expresa intenciones muy agresivas, hecho que, desde una perspectiva evolutiva, tendría que motivar respuestas conductuales apropiadas, esto es, respuestas biológicamente adaptativas, en el oyente.

Ahora bien, resulta difícil, si no imposible, inducir emociones genuinas y nítidamente definidas en condiciones controladas de laboratorio. Por ello, en su primer estudio, el grupo encabezado por Szameitat hizo lo más parecido: contrataron a profesionales (tres actores y cinco actrices) y grabaron sus risas. No es lo ideal, evidentemente, y las investigadoras reconocen la limitada aplicabilidad de utilizar «representaciones emotivas» en vez de emociones genuinas. Pero «se instruyó a los actores para que se centrasen exclusivamente en la experiencia del estado emotivo, bajo ningún concepto en la expresión hacia el exterior de la risa». He aquí los cuatro tipos fundamentales de risa que los actores hubieron de interpretar, juntamente con las descripciones y muestras de guiones que les facilitasen para entrar en situación:

> ***Risa gozosa:*** *Encontrarse con un buen amigo tras un largo tiempo sin verle.*
> ***Risa de desdén:*** *Mofa que se le hace a un oponente vencido. Refleja la emoción de desprecio y desdén, con intención de humillar.*
> ***Risa* schadenfreude*:*** *Risa que celebra el infortunio ajeno; por ejemplo, una caída en la calle al resbalar en un excremento de perro. A diferencia de la risa desdeñosa, no tiene intención de herir gravemente a esa persona.*
> ***Risa cosquilleante:*** *Risa que provocan las cosquillas, en sentido físico y literal.*

Una vez recogidas esas grabaciones, fueron invitados al laboratorio 72 individuos angloparlantes, se les proporcionaron sendos cascos auriculares y se les pidió que identificasen las emociones que traslucían esas risas. Los voluntarios escucharon una gran cantidad de secuencias, 429 muestras en total, intercaladas aleatoriamente, que representaban cada una un golpe de risa, con una duración de tres a nueve segundos, lo que suponía entre 102 y 111 risas para cada emoción. (Esto les ocupó alrededor de una hora, una idea de pesadilla, que me recordaba aquellas series de televisión con risas enlatadas de fondo.) Se obtuvieron unos resultados impresionantes; los participantes supieron clasificar bien las muestras, de forma estadísticamente significativa, interpretando sus emociones, a menudo sutilmente expresadas.

El procedimiento seguido en un segundo estudio fue casi idéntico, pero los participantes hubieron de responder a un diferente conjunto de preguntas, concernientes a la dinámica social. En cada muestra de risa se les preguntaba si el «emisor» (es decir, quien reía) se encontraba tranquilo o excitado, si con respecto del «receptor» (esto es, el sujeto de la risa) era dominante o sumiso y si se encontraba en situación grata o desagradable y, por fin, si se estaba mostrando amistoso o agresivo hacia el receptor. En este segundo estudio no había respuestas «correctas» o «incorrectas», porque la percepción de estos rasgos en las muestras sonoras entrañaba atribuciones subjetivas. Aun así, como se preveía, cada categoría de risa (gozo, desdén, schadenfreude, cosquilleo) poseía un perfil característico en estas cuatro dimensiones sociales. Es decir, los participantes se valieron de estos sonidos para inferir fiablemente información social específica relativa a una situación que no veían. La risa gozosa, por ejemplo, invocaba opiniones de leve excitación, sumisión y valencia positiva en ambas partes. La risa desdeñosa destacaba claramente: fue muy dominante, y fue el único sonido en el que los participantes percibieron una valencia negativa hacia el receptor.

Al parecer, el humor humano apela a redes cognitivas que no poseen otras especies

Especialmente interesante fue la percepción de los participantes respecto de la risa schadenfreude (maliciosa). Se la juzgó dominante, pero no tanto como la desdeñosa; se consideró que los emisores que intervinieron en tales risas se hallaban en un estado positivo, más que los de la risa desdeñosa, aunque menos que los de cosquillas. Con relación al receptor, en la risa schadenfreude no se percibió ni agresiva ni amistosa, sino neutra. Según los autores, cuyas interpretación de estos datos estuvo inspirada por la lógica evolucionista: «La risa schadenfreude podría constituir un útil preciso (y socialmente tolerado) para dominar al oyente sin segregarle concurrentemente del contexto grupal».

Quisiera pensar que en aquellos lejanos años presenciaba en King un gozo puro, sin adulteraciones, pero mi cerebro no está hecho para descifrar diferentes estados emotivos en gorilas. Al parecer, King sigue riéndose en su jaula al ver a Ellen DeGeneres en la televisión. Me doy cuenta de que una muestra de solo dos personas es, desde luego, muy pequeña, si bien King podría encontrar graciosos a los humanos homosexuales. En cualquier caso, me causa gozo pensar en la evolución del gozo. He de añadir que esos datos sobre las ratas me han hecho considerar seriamente volver a mis tiempos vegetarianos. No es que tome ratas para cenar, claro, pero los animales que ríen sí evocan en mi mente los sufrimientos que padecen, y me causan desazón. Si los cerdos sacrificados no fueran tan fantásticamente deliciosos...

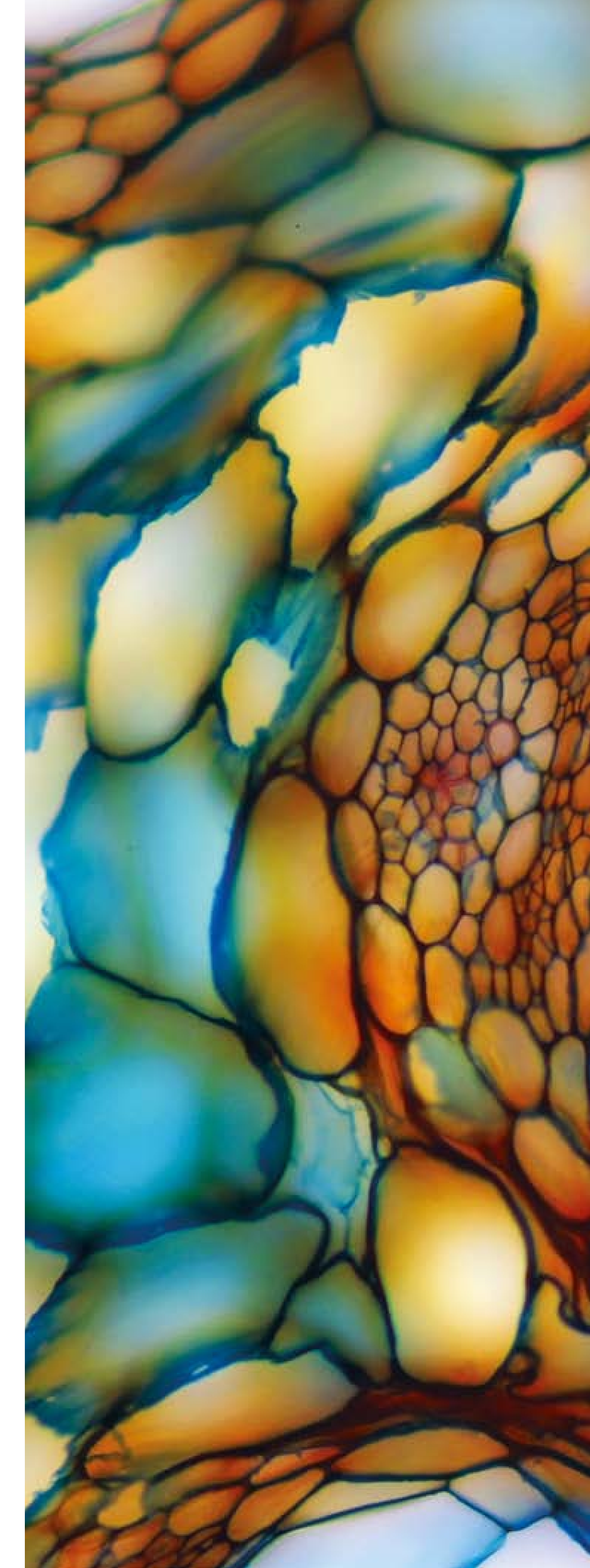
BIOLOGÍA

MARAVILLAS DIMINUTAS

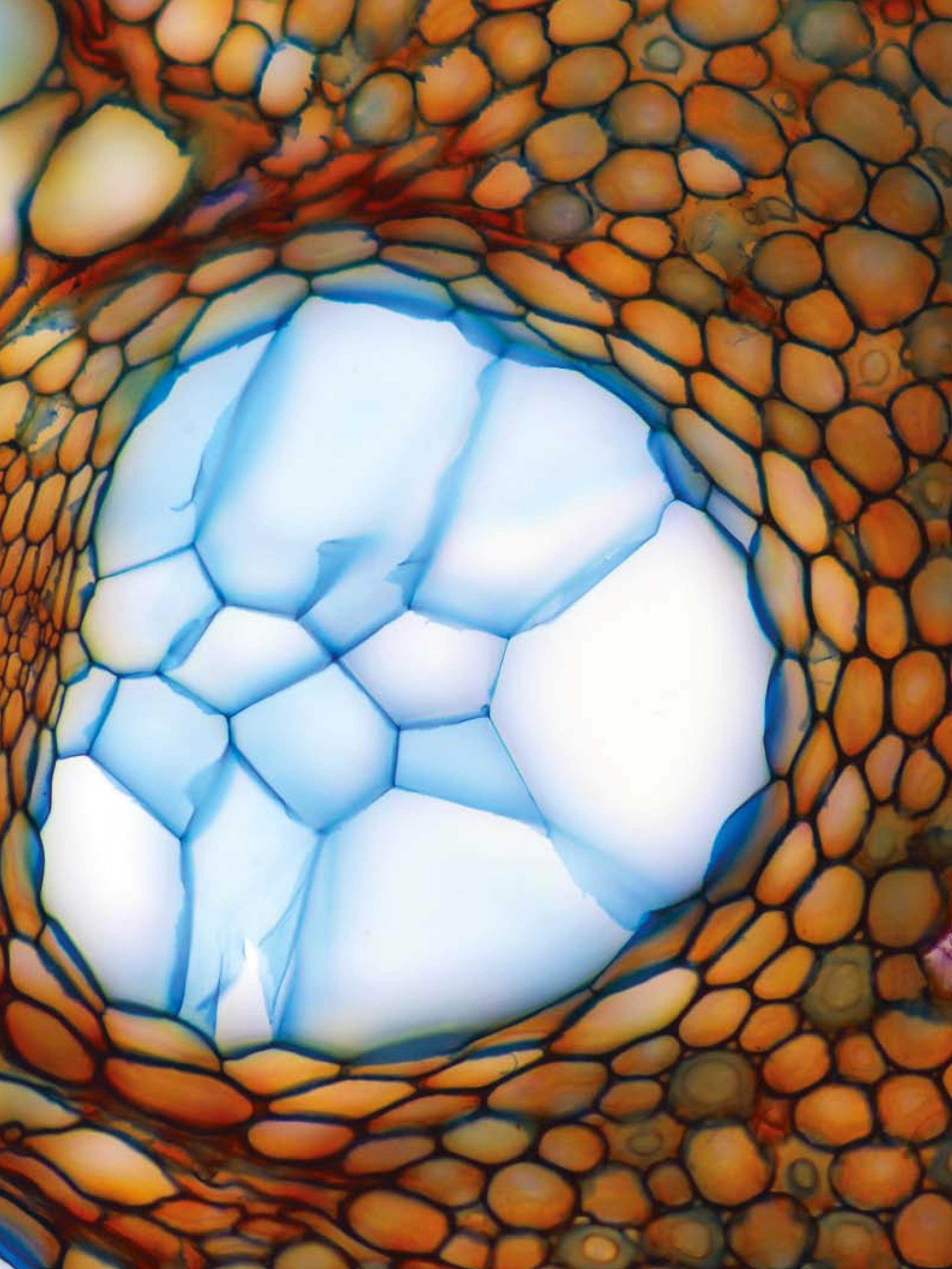
El microscopio óptico desvela secretos sorprendentes de la naturaleza

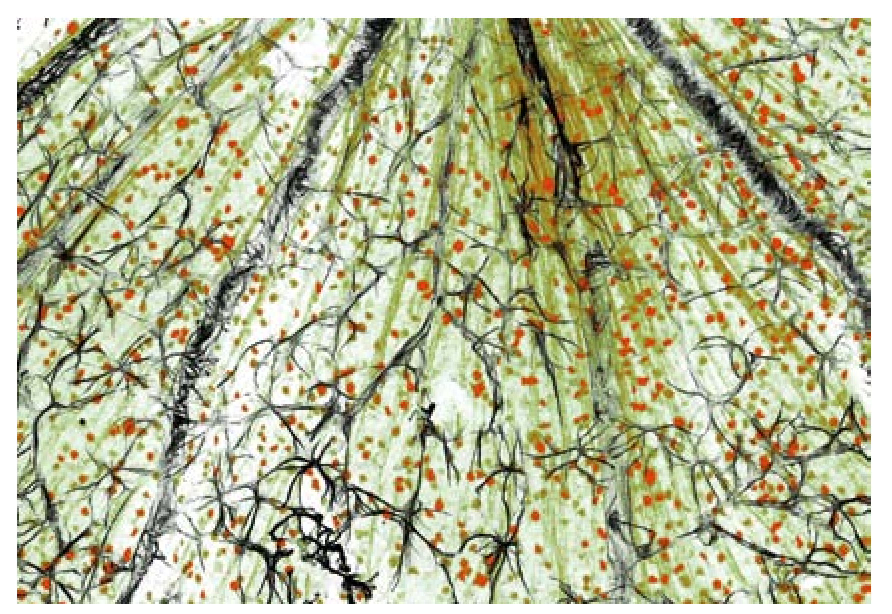
Kate Wong

Una espiral de vidrio coloreado trazada por las células de un aloe, un añoso bosque de células nerviosas en la retina de un ratón, un mar de pelos estrellados sobre las hojas de un arbusto de jardín... los seres vivos se reinventan con espectacularidad bajo el microscopio y brindan a quienes los observan una nueva interpretación de lo que Charles Darwin llamó «las infinitas formas de belleza sublime» de la naturaleza. En estos mundos diminutos, la belleza emana del ingenio de las soluciones adoptadas por la evolución frente a los retos de la vida y de las técnicas de microscopía empleadas para visualizar las estructuras y los procesos biológicos. Una ojeada a través del ocular permite descubrir un microcosmos en un embrión, un órgano o una célula. En palabras de Igor Siwanowicz, del Instituto de Medicina Howard Hughes: «El microscopio permite ver más allá de la cutícula, explorar los arreglos barrocos de las fibras musculares o la intrincada malla fractal que tejen las neuronas, y apreciar que la belleza —probablemente en el más subjetivo de los sentidos— no radica solo en el exterior». Siwanowicz es uno de los premiados en el concurso de imágenes digitales de biopaisajes de 2012 organizado por Olympus (Olympus BioScapes International Digital Imaging Competition), que admite de buen grado obras de científicos y aficionados por igual. Sus imágenes y las de otros participantes embellecen las páginas siguientes. Esperamos que desde su sillón disfrute de este viaje a los dominios de lo diminuto, donde la ciencia y el arte confluyen.



CÉLULAS DE ALOÍNA: Anatoly I. Mikhaltsov, botánico del Centro de Ecología y Biología para Niños de Omsk, estaba estudiando la anatomía de *Aloe erinacea*, un aloe amenazado de Namibia, cuando captó esta fotografía de las células de aloína (*azul*) —las cuales segregan un componente de la savia gelatinosa que rezuman las hojas cortadas de la planta— por medio de una tinción de factura propia. El grupo de células de aloína abarca 300 micrómetros de ancho.





ASTROCITOS DE LA RETINA: El tapiz de células de la retina de un ratón revela la maraña de astrocitos (*negro*) que mantiene en equilibrio los iones y el agua que bañan las neuronas (*naranja*) y sus axones (*verde*). Los largos brazos de los astrocitos envuelven los vasos sanguíneos, visibles como «senderos» negros verticales. Crean así una barrera física y química que determina las moléculas que llegan a las neuronas. La neurobióloga de la Universidad de Utah Alejandra Bosco obtuvo esta imagen de la retina, de 0,1 milímetros por 5 milímetros cuando se aplana, como parte de su investigación sobre la función de los astrocitos en enfermedades como el glaucoma.



REPRODUCCIÓN DE DIATOMEAS: Una diatomea marina de la especie *Rhizosolenia setigera* en pleno proceso de bipartición, un tipo de reproducción asexual en el que una célula madre se divide en dos células hijas. Las estructuras doradas son cloroplastos, los orgánulos donde se lleva a cabo la fotosíntesis. La cubierta transparente de esta alga microscópica está formada por cristales de sílice. El aficionado a la fotografía Wolfgang Bettighofer, de Kiel, tuvo que superponer 15 fotomicrografías para crear esta imagen, de unos 300 micrómetros, de las células recién divididas.

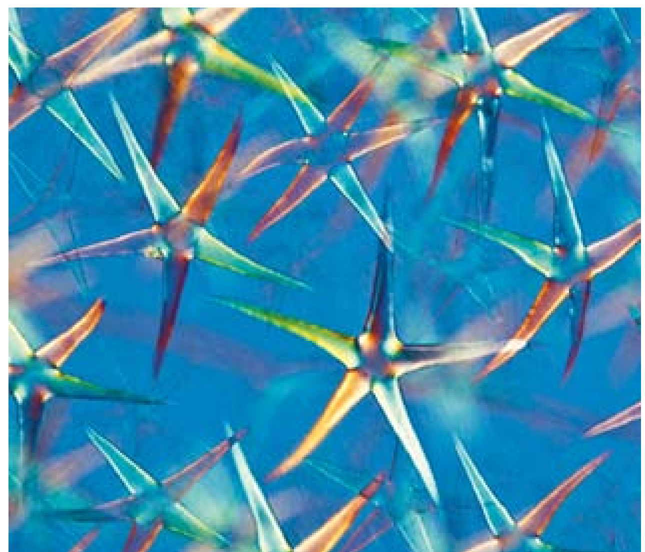


ALA DE MARIPOSA: La belleza abstracta del ala de una mariposa queda patente en esta imagen de Sahar Khodaverdi, estudiante del máster en biología vegetal de la Universidad de Tabriz. Las alas de las mariposas se hallan cubiertas de escamas delicadas. El color y la iridiscencia de las alas proceden de los pigmentos que albergan las escamas y de la interacción de la luz con las nanoestructuras de estas.



ESPORANGIOS DE HELECHO: Al observar el envés de una fronda de helecho, se descubren numerosos puntos oscuros: los soros. Cada soro está formado por un grupo de esporangios, las estructuras que albergan las esporas reproductoras. La fotografía muestra los esporangios del helecho *Polypodium virginianum* (*estructuras multicolor*) intercalados con paráfisis (*rojo*), unos pelos especializados que presumiblemente resguardan a las esporas de los elementos. El neurobiólogo Igor Siwanowicz, del Instituto de Medicina Howard Hughes en Ashburn (Virginia), visualizó el esporangio, de casi un milímetro de diámetro, con los mismos colorantes fluorescentes con los que tiñe animales invertebrados.

EMBRIÓN DE PEZ CEBRA: Karen W. Dehnert, Scott T. Laughlin, Holly Aaron y Carolyn R. Bertozzi, de la Universidad de California en Berkeley, captaron esta imagen de un embrión de pez cebra de 19 horas de vida con un objetivo de 10 aumentos. Lo hicieron mientras estudiaban los cambios en la distribución de los carbohidratos portadores de un azúcar, la fucosa, durante el desarrollo embrionario. La unión de la fucosa a ciertas moléculas resulta esencial para el correcto crecimiento del embrión.



TRICOMAS FOLIARES: Las hojas del arbusto ornamental *Deutzia scabra* se hallan cubiertas por pelos estrellados de unos 0,25 milímetros de diámetro. Protegen a la planta de los animales herbívoros, el viento, las heladas y la radiación ultravioleta. En Japón, los tallistas utilizan estas hojas abrasivas como lija fina. Para enfocar este tupido tapiz formado por pelos de longitud diversa, el microfotógrafo Steve Lowry tomó una serie de fotografías a diferentes distancias focales. Con la ayuda de un programa informático, integró después esa información para crear una sola imagen superpuesta.

ORUGA DE POLILLA: En esta segunda micrografía de I. Siwanowicz, una oruga de polilla limacódida se prepara para iniciar la última fase de la metamorfosis en su capullo de seda, del que saldrá convertida en una polilla adulta. Cada uno de sus ojos simples consta de seis lentes cóncavas. Los adultos, en cambio, poseen grandes ojos compuestos poliédricos. Para compensar la deficiente visión que le confieren sus precarios ojos, las larvas están recubiertas de otros receptores sensitivos. La cabeza de la oruga mide medio milímetro de ancho.

PARA SABER MÁS

Concurso de imágenes digitales de biopaisajes de Olympus: **www.olympusbioscapes.com**





NEUROCIENCIA

Dependencia y cooperación entre los sentidos

Nuestros diferentes sentidos colaboran entre sí más de lo que se pensaba. Lo que oímos depende mucho de lo que vemos y tocamos

Lawrence D. Rosenblum

A finales de los años setenta del siglo xx, el FBI contrató a Sue Thomas y a otras ocho personas sordas para que analizaran huellas dactilares. Razonaron en el *Bureau* que a los sordos podría resultarles más fácil mantener la concentración en esta pesada tarea, que exige gran atención y meticulosidad. Pero a Thomas, ya desde el primer día, el trabajo le resultó de una monotonía insoportable. Tan repetidas fueron sus quejas a sus superiores que estaba dispuesta a ser despedida y quedarse sin el empleo, cuando su jefe la convocó a su despacho para una reunión con otros agentes.

Thomas no fue despedida. Diríase que, en cierto sentido, fue ascendida. Los agentes le enseñaron un vídeo que mostraba la conversación de dos sospechosos; le pidieron que descifrase sus palabras. En anteriores ocasiones, los agentes habían observado la gran destreza de Thomas para leer de sus labios lo que ellos decían. Y, como suponían sus colegas, Thomas interpretó fácilmente el diálogo de los sospechosos, que los implicaba en un círculo de apuestas ilegales. Así comenzó la carrera de Thomas como primera experta sorda en lectura de labios.

Toda una vida dependiendo, para poder comunicarse, de la lectura de palabras en labios ajenos, había afinado hasta el virtuosismo la destreza de Thomas. Pero también todos nosotros dependemos de un talento similar, y en mayor medida de lo que pensamos. En efecto, nuestra capacidad para entender el habla mengua, si no alcanzamos a ver los labios del hablante, especialmente en ambientes ruidosos o cuando el hablante tiene un fuerte acento que nos resulta extraño.

Aprender a percibir el habla con la vista, y no solo por el oído, constituye parte importante de la adquisición de esta facultad; en consecuencia, los pequeñines ciegos, que no pueden ver la boca de quienes hablan cerca de ellos, suelen tardar más que el promedio en aprender determinados aspectos del lenguaje. Sencillamente, no podemos dejar de integrar palabras que oímos con las que vemos en los labios de los demás. Investigaciones recientes sobre la percepción multisensorial del habla han contribuido

VICTORIA LING (*fotografía*); KYLE BEAN (*ilustración*)

EN SÍNTESIS

En el pasado, la neurología entendía el cerebro como una navaja multiusos, dotado de regiones diferenciadas, dedicadas exclusivamente a las distintas formas de percepción que ofrecen los sentidos, como la vista, el oído, el olfato, el gusto y el tacto.

Estudios de psicología y de neurociencia realizados en los últimos treinta años han revelado que el cerebro es un órgano multisensorial, que conjuga sin cesar los datos que le envían los diversos sentidos.

La revolución multisensorial no se ha limitado a cambiar la comprensión del funcionamiento cerebral: ha propuesto nuevas formas de ayudar a ciegos y sordos, así como perfeccionar los programas de reconocimiento del habla.

a revolucionar la forma de entender cómo organiza el cerebro la información que recibe de los distintos sentidos.

Neurocientíficos y psicólogos han abandonado en gran medida ciertas ideas tradicionales sobre el cerebro, que era concebido a modo de una de esas navajas suizas multiusos. Presumían en él regiones diferenciadas, dedicadas a los distintos sentidos. Se piensa ahora que el cerebro ha evolucionado hacia una intercomunicación entre los sentidos tan intensa como le es posible. En pocas palabras: las regiones sensoriales del cerebro se encuentran físicamente entretejidas.

Nuestros sentidos están cada uno atento a lo que acontece en los demás. Así, por ejemplo, aunque la corteza visual se ocupa ante todo de la visión, también es perfectamente capaz de interpretar datos llegados de otros sentidos. Si a un individuo con visión normal se le vendan los ojos, en el intervalo de unos 90 minutos adquirirá por mediación de su corteza visual una sensibilidad extra al tacto; análogamente, se ha demostrado mediante escáneres cerebrales que la corteza visual de los ciegos se reconfigura por sí mismas para aguzar el oído. Cuando mordisqueamos las patatas fritas de una bolsa, la nitidez del crujido en la boca determina en parte nuestro juicio sobre su sabor; los experimentadores logran sesgar los resultados de las pruebas de sabor retocando lo que oyen los probandos. Estando inmóviles, el lugar al que miramos, y lo que vemos, influye en nuestra postura corporal. Dicho claramente: investigaciones de los últimos 15 años demuestran que ningún sentido opera de forma solitaria. La revolución multisensorial está sugiriendo también nuevas formas de dispositivos para ciegos y sordos, como los implantes cocleares.

SÍLABAS MUDAS

Uno de los primeros y más robustos ejemplos de percepción multisensorial se denomina efecto McGurk, dado a conocer por Harry McGurk y John MacDonald en 1976. Si se observa un clip mudo de vídeo, en el que una persona vocaliza y repite la sílaba «ga», y simultáneamente se escucha una grabación de esa misma persona que pronuncia la sílaba «ba», lo que *se oye* será que pronuncia «da». Las «ga» mudas alteran nuestra percepción de las «ba» sonoras, porque el cerebro integra lo que el cuerpo oye y ve. El efecto McGurk se manifiesta en todas las lenguas; y sigue haciéndolo incluso si es estudiado durante 25 años. Quien escribe da fe.

El habla que se oye está influida también por el habla que se palpa. En 1991, Carol Fowler, entonces en el Colegio universitario Dartmouth, y sus colegas solicitaron de voluntarios sin experiencia previa que ensayasen la llamada «técnica Tadoma». Se trata de averiguar lo que otro dice poniéndole los dedos sobre los labios, las mejillas y el cuello. Antes de los implantes cocleares, muchas personas ciegas y sordas (entre ellas, Helen Keller) se basaban en Tadoma. En el experimento, las sílabas que los voluntarios palpaban modificaban su interpretación de sílabas audibles procedentes de altavoces cercanos.

Gemma Calvert cartografió en 1997 las regiones cerebrales de máxima actividad al leer los labios. (Enseñaba en Oxford por entonces.) Voluntarios sin experiencia formal previa en ese menester leyeron un rostro que iba articulando, lenta y silenciosamente, los números de uno a nueve. Calvert y sus colegas observaron que la lectura de labios excitaba la corteza auditiva (la región del cerebro que procesa sonidos) así como otras regiones cerebrales relacionadas, cuya activación al oír hablar era conocida. El trabajo en cuestión supuso una de las primeras demostraciones de influencias en la transmodulación sensorial en una región cerebral que se creía dedicada en exclusiva a un sentido. Estudios más re-



Lawrence D. Rosenblum enseña psicología en la Universidad de California en Riverside. Es autor de *See what I'm saying: The extraordinary power of our five senses* (W. W. Norton, 2010).

cientes han aportado nuevos datos de síntesis sensorial. Se sabe ahora que el tallo cerebral auditivo responde a aspectos solo vistos, pero no oídos, del habla; con anterioridad se creía que únicamente intervenía en procesos sonoros más rudimentarios. Apoyándose en técnicas de neuroimagen se ha demostrado que durante el efecto McGurk (que consiste en oír «da» a pesar de que el sonido grabado es «ba») el cerebro se comporta como si fuese la sílaba «da» la que llega a los oídos del probando.

Tales hallazgos mueven a pensar que el cerebro pudiera baremar por igual el habla captada desde los oídos, desde los ojos e incluso desde la piel. No estamos diciendo que esas distintas modalidades proporcionen idéntica cantidad de información; evidentemente, el oído capta más detalles del habla que la vista o el tacto. Pero sí afirmamos que el cerebro efectúa un esfuerzo concertado para considerar y combinar los diferentes tipos de información hablada que recibe, con independencia de su modalidad.

LO LLEVAS ESCRITO EN LA CARA

En otros casos, sentidos diferentes se ayudan unos a otros para procesar un mismo tipo de información. Las formas de hablar, peculiares de cada persona, proporcionan información sobre quiénes son, independientemente de que su hablar sea visto u oído. Mis colegas y yo filmamos hablantes, manipulamos después los vídeos para eliminar todos los rasgos faciales reconocibles y transformamos sus rostros en motivos de puntos brillantes que centelleaban un instante, oscilando arriba y abajo, como luciérnagas, allí donde estarían las mejillas y los labios. Al reproducir los vídeos, nuestros voluntarios logran leer los labios de estas fugaces constelaciones de estrellas y reconocer a sus amigos.

Para deducir la identidad de una persona, pueden también orientarnos sonidos simples deducidos del habla. Robert Remez y su equipo, de la Universidad de Columbia, reducen el habla normal a grabaciones de ondas senoidales que suenan como los silbidos y pitidos de R2-D2 en *La guerra de las galaxias*. Aun careciendo de las cualidades típicas que caracterizan una voz, como su tono y timbre, las ondas senoidales aludidas retienen datos sobre la forma de hablar, que facultan a los voluntarios para reconocer a sus amigos. Y más llamativo: los participantes lograron asociar las ondas senoidales con los vídeos de puntos centelleantes del mismo sujeto hablando.

En vista de que las versiones aligeradas del habla, tanto si es oída como si es vista, preservan similar información sobre el estilo del hablante, cabe pensar que esas distintas modalidades de percepción se entretejen en el cerebro. Las investigaciones con técnicas de neuroimagen respaldan tal vinculación: al escuchar la voz de personas conocidas se induce actividad neuronal en el giro fusiforme, una región del cerebro humano que interviene en el reconocimiento de rostros.

Los hallazgos expuestos inspiraron una predicción todavía más extravagante. Si estas formas de percepción se encuentran entrelazadas, aprender a leer en los labios ajenos debería mejorar también la propia capacidad para entender las voces de otros. Le solicitamos a voluntarios sin experiencia en la lectura de labios que practicasen durante una hora con vídeos mudos de un parlante. Los voluntarios escucharon después una serie de frases habladas con voz, pero acompañadas de ruido de fondo aleato-

rio. La mitad de los participantes oyeron, sin saberlo, frases pronunciadas por la misma persona cuyos labios habían estado leyendo recientemente, mientras que la otra mitad oía frases de un hablante desconocido. Los voluntarios que vieron y escucharon a la misma persona tuvieron mayor éxito en extraer las frases del ruido de fondo.

PROMISCUA PERCEPCIÓN

La investigación en percepción multisensorial del habla ha inspirado el estudio de toda clase de interacciones entre sentidos, no consideradas previamente. Por ejemplo, la mayoría de nosotros sabe que el aroma es un importante componente del gusto, pero según ciertos trabajos, resulta que la apariencia visual y la sonora también alteran el sabor. En cierto caso, particularmente curioso, se descubrió que una bebida con sabor de naranja tendrá sabor a fresa si es teñida de rojo, y viceversa. En 2005, Massimiliano Zampini y su grupo, de la Universidad de Trento, demostraron que alterar el timbre de un sonido crujiente presentado a voluntarios que mordisqueaban patatas fritas determinaba, en parte, su evaluación sobre el sabor y crujido de las patatas. Si se mira a una textura visual que desciende sin cesar, como una cascada, algunas personas se convencen de que ciertas superficies texturadas están ascendiendo, a pesar de tocarlas con las manos. Otras pruebas señalan que el ingreso de señales transensoriales modifica inconscientemente nuestro comportamiento. El equipo encabezado por Tom Stoffregen, de la Universidad de Minnesota, solicitó a los voluntarios de su ensayo que se mantuvieran en pie, erguidos, y que trasladasen la mirada desde una diana próxima a otra distante. Esa simple traslación del enfoque visual indujo modificaciones sutiles, aunque sistemáticas, en la postura del cuerpo.

Otros descubrimientos similares han llegado a adquirir una importancia tal, que ahora muchos investigadores consideran que las regiones sensoriales del cerebro son intrínsecamente polivalentes. Esta revisión del modelo cerebral es acorde con otras pruebas de la plasticidad del cerebro, capaz de cambiar la función primaria de una de sus regiones ante una privación sensoria, incluso aunque sea leve, o de breve duración. A este respecto, las investigaciones con técnicas de formación de imágenes, efectuadas en los cuatro últimos años, han confirmado que basta vendar los ojos de una persona durante apenas una hora y media para inducir a su corteza visual a responder a señales táctiles. De hecho, la implicación de la corteza visual realmente intensifica la sensibilidad a ser tocado. En un ejemplo afín, la miopía a menudo refuerza las facultades auditivas y espaciales de los miopes, aunque usen gafas (que dejan borrosa una buena parte de la periferia visual). En general, la compensación transensorial es mucho más predominante de lo que se pensaba.

La revolución multisensorial ha comenzado ya a prestar ayuda a personas que han perdido alguno de sus sentidos primarios. Se ha demostrado, por ejemplo, que los implantes cocleares son menos efectivos si el cerebro del implantado ha tenido demasiado tiempo para dedicar a otro propósito (a la vista o al tacto) la corteza auditiva cerebral que ha quedado sin uso. Por ello se suele recomendar que los niños con sordera congénita reciban implantes cocleares lo antes posible. Investigaciones similares han incentivado la práctica de que los niños sordos que han recibido implantes cocleares vean vídeos de gente hablando, para que aprendan a integrar la voz que ven en los labios de hablantes con las voces que oyen.

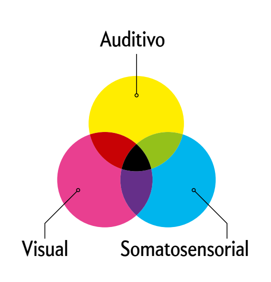
También los ingenieros que trabajan en reconocimiento de rostros y del habla han sacado provecho de la investigación en percepción multisensorial. Los sistemas de reconocimiento del habla suelen funcionar deficientemente con ruido de fondo, incluso de nivel moderado. Al enseñar a tales sistemas a analizar vídeos de la boca del sujeto cuya voz deben identificar, mejora sustancialmente su precisión, estrategia que funciona incluso con los tipos de cámaras habituales en teléfonos móviles y ordenadores portátiles.

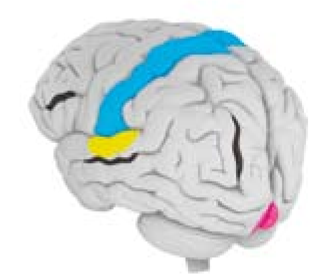
La noción de percepción multisensorial parece contradecir, en algunos aspectos, la experiencia diaria. Propendemos a clasificar los sentidos en tipos, porque cada sentido parece captar un aspecto diferente de nuestro mundo. Nos valemos de los ojos para ver a los demás; de los oídos para oírlos. Captamos la firmeza de una manzana con las manos, y la degustamos con la lengua. Pero una vez que los datos de los sentidos han llegado al cerebro, tan estricta clasificación se viene abajo. El cerebro no canaliza la información que le envían los ojos a un recipiente neuronal determinado, ni la auditiva procedente de los oídos, a otro, individual y diferenciado, como si estuviera distribuyendo monedas. Por el contrario, nuestro cerebro extrae significado del mundo de todas las maneras posibles, combinando las diversas formas de percepción sensorial.

PERCEPCIÓN

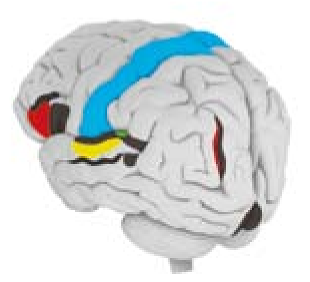
Una remodelación multisensorial

Se sabía desde hace varios decenios que ciertas regiones cerebrales integran informaciones procedentes de sentidos diferentes. Una tal región podría, por ejemplo, fundir información visual con percepciones somatosensoriales, como el tacto o la temperatura. Se ha visto ahora que la percepción multisensorial constituye una propiedad mucho más prevalente en la arquitectura neural del cerebro de lo que se venía pensando, lo que sugiere que el cerebro evolucionó hacia esta intermodulación sensorial.





Esquema tradicional



Esquema emergente

Ilustraciones extrapoladas en parte de datos obtenidos de cerebros de primates. Se han representado solo las regiones sensoriales.

FUENTE: «IS NEOCORTEX ESSENTIALLY MULTISENSORY?» POR ASIF A. GHAZANFAR Y CHARLES E. SCHROEDER, EN *TRENDS IN COGNITIVE SCIENCES*, VOL. 10, N.º 6; JUNIO DE 2006 *(esquema emergente)*; UPDATED PER LAWRENCE D. ROSENBLUM, AARON R. SEITZ Y KHALEEL A. RAZAK; AXS BIOMEDICAL ANIMATION STUDIO *(ilustración)*

PARA SABER MÁS

Speech perception as a multimodal phenomenon. Lawrence D. Rosenblum en *Current Directions in Psychological Science*, vol. 17, n.º 6, págs. 405-409. Diciembre de 2008.

The new handbook of multisensory processing. Dirigido por Barry E. Stein. MIT Press, 2012.

por Norbert Treitz

Norbert Treitz es profesor emérito de didáctica de la física en la Universidad de Duisburgo-Essen.



Coriolis: ser o parecer

¿Desviaciones hacia el oeste o hacia el este? ¿Rosas polares? Los pequeños efectos de la rotación terrestre se pueden entender y calcular de manera sencilla

La trayectoria de una piedra que cae libremente por una gran chimenea o por la torre para experimentos en caída libre de Bremen, ¿acaba justo en la vertical de su punto de partida o un poco hacia el oeste o el este? Por «caída libre» entendemos un movimiento que empieza en reposo y sobre el que únicamente actúa la fuerza de la gravedad. Pero ¿qué quiere decir en este caso «en reposo»? Mientras la piedra cae, la Tierra gira sobre su propio eje y se traslada alrededor del Sol, sin mencionar el movimiento del sistema solar con respecto a los demás astros. Siempre me he preguntado la razón de que la máquina del tiempo de H. G. Wells conservase una posición relativa al suelo, en vez de relativa al centro de gravedad de la Tierra o del sistema solar, por no hablar de la rotación galáctica.

La piedra, hasta que la soltamos, también participa de la rotación terrestre y, por tanto, vista «desde fuera», no se puede afirmar en absoluto que se encuentre en reposo. No es así en el caso de un meteorito procedente del espacio. Hasta que no colisiona con la Tierra no participa de la rotación de esta. Para que resulte más sencillo de entender, imaginémonos que se dirige justo hacia el centro de la Tierra y con gran precisión entra por la abertura superior de la torre. En lo que tarda en tocar tierra, la superficie de nuestro planeta, torre incluida, se habrá desplazado por su rotación ligeramente hacia el este. Del meteorito se dirá —¡qué injusto!— que se desvió hacia el oeste.

Para que sea aún más fácil: supongamos que el torreón se encuentra sobre el ecuador. Significa que se desplaza en un segundo, por el movimiento de rotación de la Tierra, nada menos que 465 metros (*véase el recuadro* «La Tierra es rápida»). Si la torre tuviera una altura de 125 metros y el meteorito se moviese a la velocidad media de una piedra que cayese desde lo alto de la torre —lentísimamente para un meteorito—, acabaría dando en el suelo a unos 2,3 kilómetros de distancia del torreón (*véase el recuadro* «La caída desde la torre»).

Como no se ve nada de esto en una piedra que cae, hace 400 años tenían muchas dudas de que la Tierra rotase. ¿Y el viento en contra, qué?

En el instante inmediatamente anterior a que la soltásemos en la parte superior de la torre, la piedra se desplazaba con nosotros horizontalmente a una velocidad de 465 metros por segundo, igual que la torre. Al soltarla estamos dando en realidad, pues, comienzo a un lanzamiento horizontal, con esa velocidad inicial. Entonces, en el sistema de referencia de la torre en movimiento, ¿la piedra se limita a caer en vertical?

Un pequeño efecto

No del todo. Y es que no hemos tenido en cuenta que la parte más alta de la torre se encuentra algo más alejada del centro de la Tierra que el suelo y, por tanto, tiene una velocidad efectiva algo mayor. La diferencia es de 9,13 milímetros por segundo. La piedra parte con esa velocidad inicial mayor, se precipita hacia el suelo y, tras cinco segundos de caída, acaba 45 milímetros al este del lugar sobre el que una plomada indicaría la posición de salida: tenemos una desviación hacia el este, pues.

¿Es este el resultado final, al menos para las condiciones simples que se dan en el ecuador? Si somos muy quisquillosos, objetaremos que durante esos cinco segundos la Tierra ha descrito en su rotación un pequeño ángulo; lo que al principio era la vertical, pues, deja de coincidir con la vertical (con respecto al centro de la Tierra) al final de la caída. El ángulo equivale con gran exactitud a la relación entre el tramo horizontal recorrido (2,3 kilómetros) y el radio terrestre (6367 kilómetros), es decir, 0,00036.

Corrección del pequeño efecto

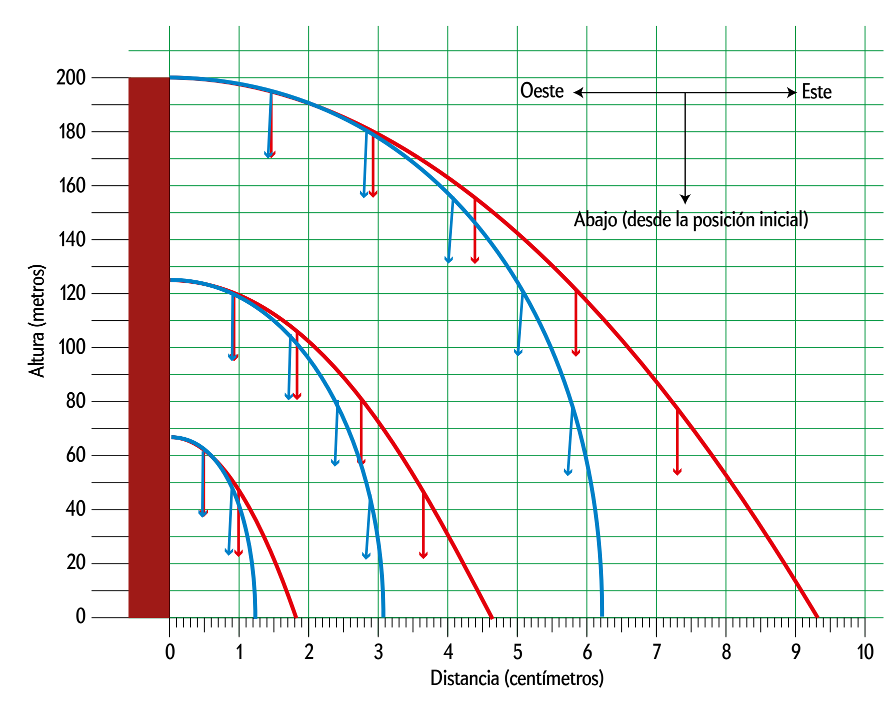
Coloquemos ahora el origen de nuestro sistema de coordenadas en el punto del suelo al que señalaría una plomada suspendida del punto donde empiece la caída, y dejemos que acompañe a la Tierra en su movimiento; sin embargo, ese sistema de referencia no deberá girar, deberá mantener la orientación del instante de partida (en el que el eje y apunta hacia arriba). Entonces, la gravedad no solo atraerá hacia abajo, sino que también, con el paso del tiempo, tirará cada vez más hacia atrás. Dicho de manera más precisa: la componente de la aceleración de caída en la dirección negativa del eje x aumentará de modo lineal con el ángulo de giro (pequeño) de la Tierra y, por tanto, con el tiempo; en los cinco segundos que dura la caída desde la torre pasará, pues, de 0 a 3,6 mm/s^2.

Esa aceleración cumple la dependencia temporal da/dt = 0,72 mm/s^3. El recorrido se obtiene mediante la integral triple en el tiempo: a = 0,72 t mm/s, v = 0,36 t^2 mm/s^2 y s = 0,12 t^3 mm/s^3. Ya que todos los valores iniciales son 0, en los cinco segundos debemos restar 15 milímetros de la desviación hacia el este que habíamos calculado anteriormente.

LA TIERRA ES RÁPIDA

La circunferencia de la Tierra en el ecuador es de 40.076 kilómetros. Cada 86.164,099 segundos, un «día sidéreo», la Tierra tiene la misma orientación respecto del firmamento. De ahí obtenemos una velocidad para un punto en el ecuador, desde la perspectiva de un sistema de referencia asociado al firmamento, de 465 metros por segundo.

Si dejamos caer una piedra en el ecuador, seguirá la trayectoria de una de las curvas azules, según sea la altura. Si no tenemos en cuenta que la dirección de la aceleración de caída (*flechas*) está rotando durante la caída, sobreestimaremos la desviación hacia el este en un 50 por ciento (*curvas rojas*). Las curvas azules acaban verticales y son, por tanto, casi cuartos de elipse.



La consideración de este efecto nos ha llevado, pues, a corregir el valor anterior de 4,5 cm nada menos que en un tercio. Puesto que el efecto total no es mucho mayor que la corrección, ha merecido la pena ser puntillosos.

Johann Friedrich Benzenberg (1777-1846), alumno de Georg Christoph Lichtenberg, demostró en 1802 la desviación hacia el este dejando caer objetos desde los 76 metros de altura de la torre de la iglesia de San Miguel de Hamburgo, y de esa forma consiguió una prueba de la rotación terrestre (aunque para aquel entonces apenas se la cuestionaba ya seriamente).

Experimentos con péndulos

Mientras que el experimento de la desviación hacia el este de Benzenberg funciona a las mil maravillas en el ecuador, no ocurre lo mismo en los polos. Con el péndulo de Foucault sucede justo lo contrario. Es posible que Vincenzo Viviani (1622-1703), junto a Torricelli, el alumno más famoso de Galileo, llevara ya a cabo en 1661 el experimento por el que 190 años más tarde Léon Foucault (1819-1868) cobraría aún más fama.

En todo museo de física que se precie hay un péndulo de Foucault que durante el horario de apertura va derribando pequeñas piezas de madera. Da la impresión de que se ve a la Tierra girar bajo el péndulo. Pero no con su velocidad angular real, sino con un valor algo menor, ya que hay que multiplicar por el seno de la latitud geográfica. Pensemos de nuevo en los polos, pues allí lo de ver cómo gira la Tierra bajo el péndulo se puede tomar al pie de la letra.

Colocar correctamente en suspensión un péndulo en las latitudes templadas no es nada fácil. Primero, su balanceo debe perdurar lo suficiente para que comprenda una parte considerable de un giro terrestre. Segundo, su suspensión o una alimentación de energía que se le aplique no deben acoplarlo a la rotación terrestre. Un simple electroimán fijado en el suelo con el fin de compensar las pérdidas por rozamiento del péndulo puede arruinar el efecto. Un modelo a escala menor del experimento podría consistir en una aguja suspendida por una punta de un imán fijado a un trípode que, a su vez, descansase sobre una plataforma giratoria para tartas.

A un péndulo que cuelgue sin acoplamientos sobre uno de los polos no le importará la rotación terrestre; se orientará con respecto al proverbial «resto del universo» (al que mando un saludo desde aquí), que se compone de muchos objetos muy pesados y sumamente lejanos, en especial estrellas y galaxias. Se mueven para aquí y para allá, y no despacio, pero podemos elegir un sistema de referencia en el que estos movimientos se promedien, y promediados se anulen. La Tierra gira con respecto a este sistema una vez durante un día sidéreo.

El péndulo simple nos lleva a hacernos preguntas bastante básicas. Para demostrar la existencia del espacio absoluto, Isaac Newton se sirvió del experimento mental del famoso cubo colgado que rota lleno de agua: si el cubo no gira respecto de ese espacio, su superficie es exactamente plana, o dicho de manera más precisa, adopta la forma de una superficie equipotencial de su planeta. Así se distingue un sistema de referencia «absoluto» de los que giran respecto a él.

¡Pero cuidado!, entre los sistemas de referencia que se mueven unos respecto a otros a velocidad constante (vectorialmente hablando), no hay uno que sea el absoluto. Ya en la mecánica clásica (o newtoniana) se deducía que no había experimento mecánico que permitiese hallar un sistema de referencia absoluto o marcar alguno como tal. Según la teoría especial de la relatividad, sobre todo por la invariabilidad de la velocidad de la luz, eso también es válido para los experimentos ópticos. Sin embargo, la física no es, ni mucho menos, tan indiferente a las

LA CAÍDA DESDE LA TORRE

Como unos pocos eruditos del Colegio Merton de Oxford ya sabían hace 600 años, la velocidad media durante el movimiento con aceleración constante es igual a la velocidad instantánea una vez transcurrida la mitad del tiempo total. Esto también sucede aunque no se comience desde una posición en reposo.

Un objeto en caída es acelerado por la Tierra a razón de 10 m/s^2. Si cae desde una situación en reposo durante 5 segundos habrá alcanzado tras 2,5 segundos (esto es, la mitad del tiempo total) 25 m/s, lo que equivale a la velocidad media durante los 5 segundos. La altura de la caída es, por tanto, de 125 metros.

CHRISTOPH PÖPPE, SEGÚN NORBERT TREITZ/SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

rotaciones del sistema de referencia como a los movimientos de traslación (véase el experimento newtoniano del cubo).

Ernst Mach (1838-1916) lanzó el guante (y Albert Einstein lo recogió): ¿qué haría realmente el péndulo si la Tierra y él estuvieran solos en el cosmos? ¿Necesita el péndulo de las galaxias o le basta con un espacio absoluto aunque esté vacío? Ya que no podemos deshacernos del resto del mundo tan fácilmente, no hay una respuesta experimental a la pregunta.

Curvas cicloidales

En un sistema de coordenadas que se desplaza siguiendo el movimiento de rotación de la Tierra, pero que conserva su orientación, el péndulo situado en el polo se mantiene constantemente en un único plano, que forma un ángulo recto con respecto al suelo; es decir, un plano que es, al pie de la letra, un plano vertical. Esto es cierto solo si el movimiento del péndulo arranca desde su posición inicial de reposo por medio de un impulso. Si se sigue la manera usual de tirar del péndulo y soltarlo, entonces estaremos transmitiéndole parte del impulso de la rotación terrestre, con lo que a la larga el movimiento no permanecerá en un mismo plano.

Si desplazamos el péndulo cuando tiramos de él poco en comparación con su longitud, podremos suponer que el centro de gravedad del peso del péndulo se moverá describiendo no un cascarón esférico, sino una paraboloide. Con esta premisa, las componentes horizontales de la aceleración se dirigirán siempre al punto medio y serán proporcionales a la distancia a este. En la proyección sobre la horizontal, el péndulo se comportará como un oscilador armónico en dos dimensiones. En general, la curva así descrita es una elipse. Degenerará en un segmento de recta, que el péndulo irá recorriendo yendo y viniendo sobre ella, cuando el impulso inicial se dirija justo al centro o se aparte de él, y se convertirá en un círculo cuando el impulso forme un ángulo recto con respecto al segmento que une la posición inicial y el centro, y además tenga la magnitud adecuada.

Pero esto solo es válido con respecto al sistema inercial (con una orientación fija respecto al firmamento). Supongamos que la bola del péndulo deja caer constantemente un fino hilo de tinta. En las inmediaciones del polo, el péndulo no dibujaría una elipse. Para observar la elipse tendríamos que colocar el papel sobre un disco rotatorio que describiese exactamente una rotación al día, de modo que permaneciera en reposo respecto al firmamento (en astronomía se denomina «seguimiento» a este procedimiento; con él, los telescopios pueden observar el mismo astro durante horas). Si el papel está fijo en el suelo, el movimiento del péndulo se solapará con el del giro terrestre.

Nos encontramos entonces con unas hermosas a la par que interesantes curvas que ya hemos tratado en más de un artículo: las curvas cicloidales. Bajo este término se engloban las epitrocoides e hipotrocoides.

Una curva cicloide se forma sumando vectorialmente en un plano dos movimientos circulares, ambos con velocidades angulares constantes. Cada una de estas curvas se puede generar de dos maneras distintas: mediante el giro de una circunferencia o por fuera o por dentro de otra circunferencia. En la práctica se puede hacerlo muy bien con ruedas dentadas.

Si giramos el papel uniformemente mientras dibujamos una cicloide, conseguiremos de nuevo una cicloide, aunque no tendrá por qué ser del mismo tipo. Con la trigonometría elemental se puede demostrar.

Las elipses son un caso especial de cicloides; y sigue siendo esto cierto para las elipses que adelgazan hasta que resultan casi irreconocibles y reciben el nombre de segmentos. El reguerillo de tinta de nuestro péndulo de Foucault dibuja, por tanto, una cicloide sobre el papel fijo en el suelo (*véase el recuadro* «Las huellas del péndulo de Foucault»).

Cuando en el sistema inercial el péndulo oscila sobre un segmento, la rotación terrestre no cambia el hecho de que cada oscilación pasa por el origen. La curva que se describe en el sistema de referencia rotatorio es una «rosa polar». Con este nombre tan romántico se designa a una cicloide que siempre pasa por el punto medio y que por fuera tiene hermosos lóbulos redondeados.

Por el contrario, si antes de empezar la oscilación mantenemos el péndulo separado de la posición de equilibrio, irá dibujando, junto con nuestra mano, un círculo respecto del sistema inercial, mientras que en el sistema rotatorio se encontrará en reposo. Si lo soltamos entonces, trazará una elipse en el sistema inercial y, por tanto, en ninguna oscilación pasará por el origen. En el sistema inercial, el sistema se encontrará en movimiento en los puntos de máxima elongación. En el rotatorio permanecerá en reposo durante un momento, como al inicio, pero cada vez en un punto distinto, lo que nos dará las puntas de una hipocicloide.

¿Y qué pasa con Coriolis?

Los cálculos que en un sistema inercial son muy sencillos, ya no lo son tanto en uno rotatorio. Entre otras cosas, en cuanto algo se mueve respecto a un sistema rotatorio nos topamos con una aceleración que lleva el nombre de Gaspard Gustave de Coriolis (1792-1842). Esta aceleración nos puede echar una mano como herramienta de cálculo, pero la fuerza correspondiente no deberíamos tomárnosla demasiado en serio. Lo mismo vale para la fuerza centrífuga, que en esto aparece solo formalmente. Ambas son, en este sentido, fuerzas aparentes: solo parecen actuar en sistemas que no son inerciales.

Cabe verlo con el siguiente ejemplo: usted está grabando con su videocámara una casa grande, pesada, y mientras tanto va girando aceleradamente la cámara. En la pantalla veremos una casa que se mueve con esa aceleración. La fuerza que movería la casa en el sistema inercial de esa misma manera sería igual a la aceleración por la masa de la casa: realmente demoledora, mucho mayor que la de un terremoto. Por suerte, en la casa no percibiríamos en absoluto tamaña fuerza aparente.

SISTEMA INERCIAL

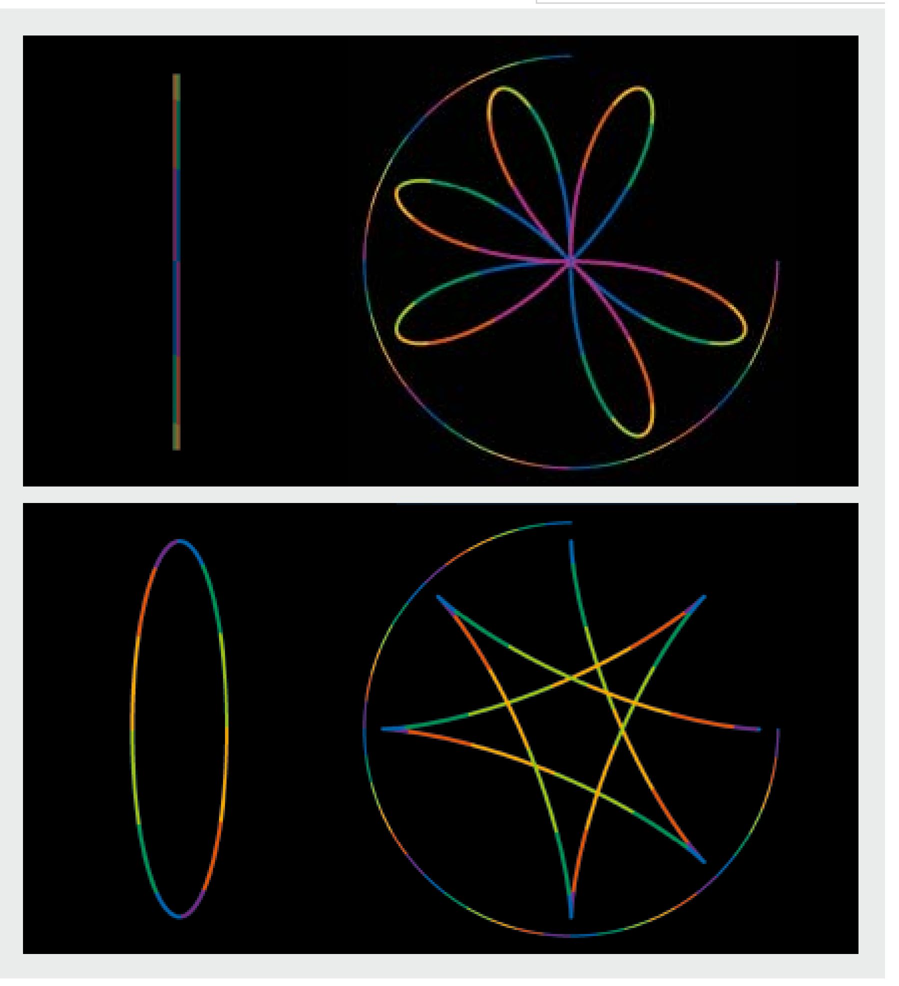
Un sistema inercial es un sistema de referencia (es decir, una clase de sistemas de coordenadas que se diferencian únicamente por la elección del origen) en el que la conservación del impulso se puede determinar inmediatamente. La primera de las tres famosas leyes de los *Principia* de Newton la formulan de la siguiente manera: para todos los objetos que no están sujetos a ninguna influencia, el vector de la velocidad, medido en el sistema, permanece constante. Con «ninguna influencia» lo que se quiere decir es que no reciben ningún impulso externo. Se aproximan a ello bastante los edificios en la Tierra y los trenes que circulan en línea recta. La desviación hacia el este y el péndulo de Foucault muestran que no estamos tratando exactamente con sistemas inerciales.

LAS HUELLAS DEL PÉNDULO DE FOUCAULT

Estamos mirando desde arriba un péndulo de Foucault que oscila (con una frecuencia bastante baja) sobre uno de los polos terrestres; a la izquierda, en un sistema inercial («sidéreo», es decir, siempre con la misma orientación con respecto al firmamento); a la derecha, en un sistema que rota con la Tierra. Con el péndulo se mueve un puntero que mantiene una orientación constante respecto a una estrella fija.

Arriba: inicio con un impulso desde el centro. *Abajo*: se empieza tirando y soltando. Las curvas de las trayectorias son una recta y una «rosa polar» arriba, y una elipse y una hipocicloide abajo.

Para poder seguir mejor el paso del tiempo, el tintero virtual utilizado para realizar estos dibujos va eyectando a ritmo fijo seis tipos distintos de color, empezando con el azul y el verde; por arte de magia, el péndulo dibuja en el camino de ida y en el de vuelta trazos adyacentes donde en realidad tendrían que superponerse unos a otros. Es de observar que en los dibujos de abajo (donde tiramos y soltamos) obtenemos una curva hacia la derecha en el sistema inercial, mientras que en el rotatorio se generan curvas hacia la izquierda.



El programa informático con el que he calculado las trayectorias que se ven en el recuadro superior no tiene en cuenta para nada la fórmula de la aceleración de Coriolis que aparece en tantos manuales de teoría.

Orientaciones reales y aparentes de remolinos

El almirante y meteorólogo Christoph Heinrich Buys-Ballot (1817-1890) no solo demostró el efecto Doppler acústico de manera experimental con unas trompetas en un ferrocarril (de los primeros), sino que también descubrió la forma en que la rotación terrestre desvía los vientos: en el hemisferio norte, los vientos (en remolino) que entran en una zona de bajas presiones giran en el sentido contrario a las agujas del reloj. En el hemisferio sur ocurre al revés. La aceleración de Coriolis lo explica con elegancia.

Antaño se afirmaba en los manuales de física que algo similar se podría observar al vaciar una bañera porque en teoría así debía ser. En uno de los mejores episodios de Los Simpson, Lisa aprende algo parecido e invita a su incrédulo hermano Bart a que lo investigue por teléfono llamando a Australia a cobro revertido, no sin antes ilustrarle sobre el globo terrestre lo mejor que sabe. El elevado coste de la llamada sin pagar llevará a un conflicto diplomático entre los Estados Unidos y Australia y a un viaje de la familia a este país, complementado con un viaje muy majo de una cámara virtual a través del interior de la Tierra. Bart presencia cómo desagua un inodoro de los antípodas que lleva instalado un mecanismo realmente complicado para que a los visitantes del hemisferio norte no les perturben fenómenos a los que no están acostumbrados. ¡Eso si que es consideración, a las tomaduras de pelo de los manuales y a sus víctimas!

«Elementalización»

Para el final nos guardamos de nuevo algo de didáctica en serio: el oscilador armónico es un problema hasta cierto punto sencillo de la física, y la rotación de un sistema de coordenadas plano, de la geometría analítica. Sin embargo, el movimiento de un péndulo en un sistema de referencia en rotación es matemáticamente y, aún más, conceptualmente, un asunto de la física teórica, incluso en la versión descafeinada que sitúa el péndulo en uno de los polos.

«Elementalización» no significa en ningún caso explicar algo incorrecta o parcialmente, sino mostrar con claridad los ingredientes simples fundamentales. El programa informático para resolver ese sencillo problema se compone de siete líneas de programación y se puede entender sin más ayudas. El programa correspondiente para el péndulo en un sistema de referencia rotatorio va igual de bien y produce las mismas curvas; pero no se trata de eso. Aun bien empleado, el ordenador no puede sustituir a ningún experimento; solo confirma nuestra interpretación del mismo.

NORBERT TREITZ

por Gabriel Uzquiano

Gabriel Uzquiano es profesor de filosofía en la Universidad de California del Sur.



Potencias de dos

Curiosidades de la notación binaria

Existe un dicho de acuerdo con el cual hay 10 tipos de personas, las que conocen la notación binaria y las que no. La clave, naturalmente, reside en que en notación binaria la secuencia '10' denota el número 2.

En notación decimal, el último dígito en '10' corresponde a un múltiplo (0, en este caso) de 10^0, mientras que el anterior indica el múltiplo correspondiente de 10^1. De esta manera, '10' es una manera compacta de escribir $1 \cdot 10^1 + 0 \cdot 10^0$. En notación binaria, el último dígito de la expresión '10' indica un múltiplo de 2^0, y el anterior, un múltiplo de 2^1. De igual modo, '111' representa $1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 = 7$; '10101' corresponde a $1 \cdot 2^4 + 0 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 = 21$, y así sucesivamente.

¿Cómo adivinar la consonante?

Supongamos que alguien le propone lo siguiente: «Piense en una consonante, pero no me diga cuál es. Voy a emplear mis poderes de adivinación para averiguar de qué letra se trata. Para ello, bastará con que me confirme si la consonante elegida aparece o no en ciertos conjuntos de palabras».

Dado que es usted una persona curiosa, decide aceptar el desafío y escoge la consonante X. A continuación, responde con un simple monosílabo a cada una de las siguientes preguntas:

—¿Aparece su consonante en alguna de las estas palabras: *tórax, apoyo, watt, trizas, vaquería*?

—Sí.

—Muy bien. Creo entrever que su consonante se encuentra en algún lugar tras la letra Ñ. ¿Me equivoco? No responda aún, por favor. Tal vez sea mejor continuar. ¿Figura en alguno de los siguientes términos: *máximo, yema, kiwi, hinojo, leñazo*?

—Sí.

—¡Vaya! Por lo que veo, se ha decidido usted por una de las últimas letras del alfabeto. Aunque aún no logro ubicarla con tanta claridad como me gustaría, me atrevería a decir que su consonante es una de las cuatro últimas del abecedario. Continuemos. ¿Pertenece a alguna de estas palabras: *yunque, cizaña, fervor, bagaje, rock*?

—No.

—Entonces podemos descartar la Y y la Z. Pero me temo que necesitaré una pregunta más. Aparece su consonante en *tórax, epigrama, cizaña, vega, rock*?

—Sí.

—No cabe duda de que ha escogido usted la letra que ocupa el vigésimo quinto lugar del alfabeto: la X.

Aunque en este caso han bastado cuatro preguntas, de modo más general su interlocutor siempre podrá adivinar la consonante si le interpela acerca de los siguientes cinco conjuntos de palabras:

tórax, apoyo, watt, trizas, vaquería;
máximo, yema, kiwi, hinojo, leñazo;
sentimiento, efigie, dueño, valiente;
yunque, cizaña, fervor, bagaje, rock;
tórax, epigrama, cizaña, vega, rock.

Dado que hay 27 letras en el alfabeto, la posición de cada una de ellas puede escribirse en notación binaria sin necesidad de emplear más de cinco cifras (*véase la tabla*). La letra X, por ejemplo, ocupa el lugar número 25 del alfabeto, que en notación binaria se escribe como '11001' ($1 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0$).

El primer conjunto de palabras elegido por su interlocutor incluye todas las consonantes cuya posición escrita en binario contiene un '1' en el lugar correspondiente a 2^4:

P, Q, R, S, T, V, W, X, Y, Z.

El segundo, todas aquellas cuya posición en binario incluye un '1' como múltiplo de 2^3:

H, J, K, L, M, N, Ñ, W, X, Y, Z.

Los tres conjuntos de palabras restantes contienen todas las consonantes cuya posición en el alfabeto escrita en binario posee un '1' en los múltiplos de 2^2, 2^1 y 2^0, respectivamente:

D, F, G, L, M, N, Ñ, S, T, V;
B, C, F, G, J, K, N, Ñ, Q, R, V, Y, Z;
C, G, K, M, Ñ, P, R, T, V, X, Z.

Así, a medida que averiguamos si la consonante aparece o no en cada serie de palabras, obtenemos información acerca

Letra	Posición decimal	Notación binaria	Letra	Posición decimal	Notación binaria	Letra	Posición decimal	Notación binaria
A	1	1	J	10	1010	R	19	10011
B	2	10	K	11	1011	S	20	10100
C	3	11	L	12	1100	T	21	10101
D	4	100	M	13	1101	U	22	10110
E	5	101	N	14	1110	V	23	10111
F	6	110	Ñ	15	1111	W	24	11000
G	7	111	O	16	10000	X	25	11001
H	8	1000	P	17	10001	Y	26	11010
I	9	1001	Q	18	10010	Z	27	11011

del numeral binario que designa su posición en el alfabeto.

Dado que hay solo 27 letras en el abecedario, sabemos que la secuencia de respuestas «sí, sí, sí» a las tres primeras preguntas es imposible ($1 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 = 28$), de modo que podemos omitir la pregunta relativa al conjunto de palabras *sentimiento, efigie, dueño, valiente*. Dado que la serie final de respuestas fue «sí, sí, (no), no, sí», podemos deducir que la notación binaria de la posición de la letra en cuestión era '11001', que denota el lugar ocupado por la X.



¿Por qué letra empezar?

Una lotería premiará a todos aquellos ciudadanos cuyo apellido empiece por una letra que se determinará mediante el siguiente procedimiento: dispondremos todas las letras del alfabeto en un círculo y escogeremos un punto de partida; a partir de la segunda letra, descartaremos letra sí, letra no, hasta que no quede más que una. Esa última superviviente indicará la inicial del apellido de los ciudadanos premiados.

Supongamos que le ofrecen la oportunidad de escoger el lugar de inicio. ¿Qué letra debería elegir para asegurarse de que la última que permanece en el círculo coincide con la inicial de su apellido? En mi caso, por ejemplo, debería buscar un punto de partida que me asegurase que la última superviviente será la U. En general, un alfabeto de 27 letras nos garantiza que la única no descartada al final del proceso ocupará el lugar 23 a partir de la elegida como inicial. (¿Cómo cambiaría la situación si se tratase del alfabeto anglosajón, en el que no hay más que 26 letras? ¿Qué letra debería escoger usted entonces como punto de partida?)

La razón es la siguiente. Si partimos de un círculo con n objetos y deseamos saber cuál sobrevivirá tras el descarte, deberemos identificar la mayor potencia de 2 menor que n. En el caso de 27 elementos, se trata de $2^4 = 16$. Después, restaremos ese número a la cantidad de objetos en el círculo. En nuestra situación obtendremos el número 11. Basta ahora con doblar el resultado y añadir 1, con lo que obtenemos el número 23. Por tanto, si el punto de partida es la letra A, la letra superviviente será la V. En mi caso, dado que la U ocupa el lugar 22 en el alfabeto, intentaría comenzar por la letra Z.

¿Cómo podemos llegar al método anterior? El mejor modo de abordar el problema consiste en generalizar lo que ocurre con círculos de menor recorrido. Con papel y lápiz, podremos convencernos con facilidad de que el primer objeto siempre sobrevivirá en aquellos ciclos cuyo número de elementos coincida con una potencia de dos: 2, 4, 8, 16, etcétera. Si utilizamos $J(n)$ para denotar la posición del objeto superviviente en un ciclo con n elementos, entonces tenemos que $J(2) = 1$, $J(4) = 1$, $J(8) = 1$, etcétera.

A medida que incrementamos n de uno en uno, $J(n)$ crece de dos en dos: si $J(8) = 1$, entonces $J(9) = 3$, $J(10) = 5$, $J(11) = 7$, y así sucesivamente, hasta que el número del objeto superviviente vuelve a convertirse en 1 cuando llegamos a la siguiente potencia de dos: $J(16) = 1$. De manera general, podemos escribir este patrón como

$$J(2^p + k) = 2k + 1 ,$$

lo cual no es sino una manera compacta de escribir el procedimiento indicado más arriba para dar con la solución.

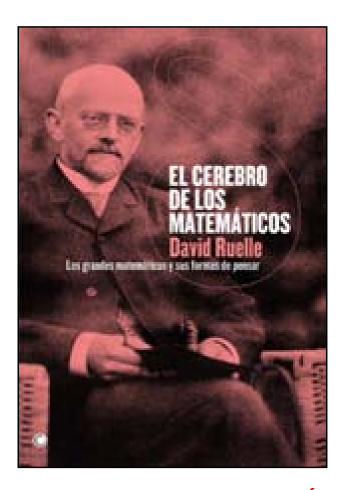
Si observamos con detenimiento la fórmula anterior, podremos percatarnos de una propiedad curiosa: la posición del elemento superviviente puede calcularse de inmediato si escribimos n en notación binaria. Para ello, basta con mover el '1' inicial de la expresión binaria de n hasta el último lugar por la derecha. El número 27, por ejemplo, equivale a '11011', por lo que si desplazamos el primer dígito hacia la última posición obtendremos '10111', que denota el número 23.

Con nuestro alfabeto, tendríamos que asegurarnos de que la distancia entre el punto de partida y la inicial de nuestro apellido ascienda a 23 posiciones. Por otra parte, si la lotería tuviera lugar en un país anglosajón con un alfabeto de 26 letras, deberíamos cerciorarnos de que la separación entre una y otra sea igual a 21: dado que 26 en binario se escribe como '11010', tras mover el primer '1' hacia extremo derecho obtenemos '10101'; es decir, 21.

PARA SABER MÁS

El segundo problema es una versión particular del **problema de Josefo**, cuya solución, de acuerdo con la leyenda, salvó la vida a Flavio Josefo, historiador judío del siglo I. Una buena introducción puede encontrarse en el artículo de Víctor Arnaiz Solórzano **Matemáticas para sobrevivir: El problema de Josefo**, revista *Matgazine*, enero de 2011 (disponible en **www.matgazine.tk**).

Después de más de cuatro años colaborando con nosotros, Agustín Rayo y Gabriel Uzquiano dejarán de escribir de manera regular en esta sección, que a partir del próximo número quedará a cargo de dos nuevos autores. A modo de despedida, IyC obsequia a sus lectores con dos Juegos matemáticos *que Rayo y Uzquiano han elegido para la ocasión. Descubra cuáles son en la página web de este artículo.*



EL CEREBRO DE LOS MATEMÁTICOS. LOS GRANDES MATEMÁTICOS Y SUS FORMAS DE PENSAR,

por David Ruelle. Antoni Bosch Editor; Barcelona, 2012.

Hombres y matemáticas

Descubriendo las estructuras de la realidad

David Ruelle es un físico matemático francés conocido por sus aportaciones a la mecánica estadística y la dinámica de sistemas. Ha acuñado términos que se han convertido en habituales en la teoría del caos, como el de «atractor extraño», y es también uno de los creadores de la nueva teoría de las turbulencias.

Se trata, por tanto, de un científico de primera línea, que además de sus publicaciones técnicas (artículos y libros muy conocidos en su área de especialidad) escribe textos de carácter divulgativo. De este tipo es *Chance and chaos*, publicado en 1993 y que se ha convertido en un clásico sobre lo que podríamos denominar «leyes del caos». Ahora aparece la traducción española de *The mathematicians' brain*, cuya primera edición es de 2007 y que también va camino de convertirse en un libro de referencia.

Dirigido a lectores con curiosidad por el mundo de las matemáticas, está dividido en 23 capítulos cortos —o se hacen cortos—, cada uno centrado en un aspecto concreto y todos ellos con interesantes observaciones sobre qué son las matemáticas hoy en día, cuál ha sido su evolución y cuáles sus perspectivas de futuro. También, tal como sugiere el título, trata sobre cómo son y cómo piensan los matemáticos, pero huyendo de los tópicos del «sabio despistado», muchas veces explicando sus propias vivencias y su relación con sus colegas, algunos de ellos matemáticos muy conocidos.

Me han parecido muy interesantes sus reflexiones sobre la relación entre nuestra forma de hacer matemáticas y las habilidades con que nos ha dotado la selección natural, poco interesada en la pericia matemática. Aunque parezca que el tema está muy manido, resulta revelador el capítulo que dedica a comparar nuestro cerebro con un ordenador. Salimos muy bien parados en visión espacial, una habilidad ya no tan necesaria para detectar comida o posibles depredadores —aunque sí para conducir, mire por donde— y que utilizamos para captar de una manera muy eficiente la información que contienen figuras, gráficos o fórmulas matemáticas. Otro tema es la memoria. Ahí los ordenadores nos ganan por goleada, tanto en memoria a largo como a corto plazo, y eso limita nuestras posibilidades al desarrollar trabajo intelectual en general y matemáticas en particular. También salimos mal parados en rapidez de cálculo. Pero ganamos en habilidades lingüísticas —¡ojalá los ordenadores fueran buenos traduciendo de un idioma a otro!— y el uso del lenguaje humano es un aspecto importante en nuestra forma de hacer y de comunicar las matemáticas.

Personas con habilidades distintas de las habituales pueden aportar soluciones que a los demás no se les ocurren. ¿Cómo serían —quizá debería decir «serán»— las matemáticas desarrolladas por extraterrestres? Dice Ruelle que un alienígena no llegaría a unas conclusiones opuestas a las nuestras, pero seguramente lo que entendería y lo que le suscitaría interés sería totalmente distinto.

También están presentes reflexiones sobre la historia de las matemáticas, desde Pitágoras y el origen de la geometría hasta el movimiento Bourbaki con sus claroscuros. Dice Ruelle que en la actualidad seguramente estamos viviendo un fin de ciclo, cada vez es más difícil ampliar el ámbito de las matemáticas manteniendo el marco axiomático actual y ya han aparecido, y parece que han venido para quedarse, las demostraciones realizadas con ordenador o las que están hechas a mano pero son tan largas que resultan imposibles de seguir a quien no esté muy metido en el tema —y son muy pocos—. Según Ruelle, todo apunta a que la lógica matemática (la metamatemática) desempeñará un importante papel en el futuro de nuestras ciencias exactas.

Respecto a la forma de pensar y de comportarse de los que hacen las matemáticas, el autor tiene interés en aclarar que sus afirmaciones son de tipo «estadístico». Es evidente que no todos los matemáticos son iguales. Resulta muy interesante su visión de la trayectoria de Alexander Grothendieck, con el que convivió en el Instituto de Altos Estudios Científicos de París, y que representa el paradigma de genio que realiza importantes contribuciones, íntegro, inflexible y coherente con sus principios, pero sin habilidad para adaptarse a las relaciones sociales y que acaba automarginado —o quizá sin el «auto»— del mundo de las matemáticas. Otro caso, este mucho más conocido, es el de Alan Turing, quien, después de realizar grandes aportaciones (algunas tan pragmáticas como descubrir los códigos de comunicación de los submarinos alemanes en la Segunda Guerra Mundial), fue humillado a causa de su homosexualidad y acabó suicidándose. Hubiera podido mantener una cierta hipocresía, habitual respecto a este tema en esa época, pero la rigidez intelectual frecuente en los matemáticos le llevó por otro camino.

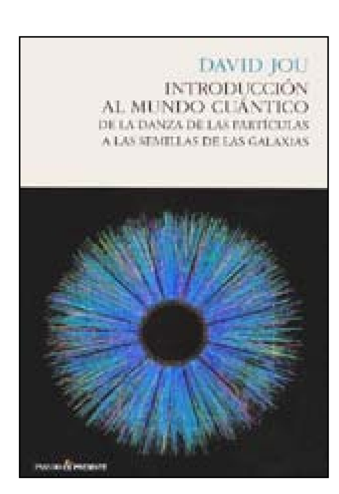
Aunque de Newton como científico siempre se habla en términos elogiosos —¿cómo no? pensarán muchos—, el autor destaca que su desenfrenada ansia de conocimiento incluía también la alquimia, a la que dedicaba gran cantidad de tiempo especulando con esotéricas relaciones entre los metales y los planetas. Un caso parecido es el de Leonardo da Vinci, también con una mente privilegiada e interesado por un amplio número de temas. Ruelle establece un paralelismo entre las personalidades de ambos personajes («sed desaforada de conocimientos e intereses diversos, así como tendencias homosexuales combinadas con una aparente castidad»), que explica echando mano de las teorías de Freud sobre curiosidad sexual sublimada en actividad artística o investigación intelectual. Es verdad que citar a Freud en contextos científicos causa controversia, pero Ruelle se mete en este terreno tomando las debidas precauciones, reconociendo algunas ideas inte resantes del padre del psicoanálisis y también poniendo de manifiesto algunas de sus pifias evidentes.

Pero no todos son Grothendieck o Turing ni Newton o Leonardo da Vinci. Los matemáticos que podríamos denominar «de a pie» tienen también un cierto perfil que les caracteriza, seguramente porque

las matemáticas son una actividad que requiere unas habilidades (inteligencia, constancia) y no necesariamente otras (ser gracioso o buen administrador), lo que hace que se inclinen más por esta disciplina aquellos que responden a ese perfil. Pero hay que insistir, como hace Ruelle, en que en todas partes hay de todo y, por supuesto, entre los matemáticos hay charlatanes y vendemotos, y también personas simpáticas y gestores excelentes. Parece que otro rasgo que caracteriza a los matemáticos es una cierta dificultad para tomar decisiones rápidas. Mientras que un abogado tiene que reaccionar rápido a las interpelaciones de su contrario, o un cirujano debe ser expeditivo ante las dificultades que se le pueden presentar en el quirófano (no se puede quedar pensando ni ir a consultar bibliografía), un matemático debe asegurarse de no tomar decisiones precipitadas que pongan en peligro todo su trabajo; debe tomarse el tiempo que haga falta y primar la certeza de sus decisiones a la velocidad con que las toma.

En definitiva, resulta curioso que un libro de tan fácil lectura contenga tantas reflexiones interesantes, no solo sobre la mentalidad de los matemáticos, sino también sobre nuestra lucha por desentrañar los misterios y las estructuras ocultas de la realidad, y sobre el papel que las matemáticas desempeñan en todo este asunto.

—Pere Grima
Universidad Politécnica de Cataluña



INTRODUCCIÓN AL MUNDO CUÁNTICO. DE LA DANZA DE LAS PARTICULAS A LAS SEMILLAS DE LAS GALAXIAS,

por David Jou. Pasado & Presente; Barcelona, 2012.

Entrando en el país de los cuantos

Panorámica global

«He intentado que este libro refleje la enorme eficacia de la física cuántica, su incidencia en muchos de los dispositivos que rodean nuestras vidas cotidianas, su impacto multimillonario en las economías avanzadas, su dinamismo avasallador en la apertura de nuevos horizontes tecnológicos, y también sus sorpresas conceptuales, sus paradojas sobre la realidad, sus problemas abiertos, e incluso aquello que tiene de gloria y aventura de la creatividad humana.» Esta loable declaración de intenciones que el autor hace en el prólogo del libro se cumple en gran medida a lo largo del mismo. En efecto, nos encontramos ante una descripción muy conseguida tanto de los aspectos fundamentales de la mecánica cuántica como de sus aplicaciones más importantes, es decir, de lo que más apropiadamente hemos de llamar física cuántica (campo científico al que este número de Investigación y Ciencia dedica un dossier).

A tal fin, el libro se divide en dos partes. En la primera se dan algunos detalles históricos de la génesis y el desarrollo de las principales ideas cuánticas, desde Planck hasta Schrödinger, pasando, claro está, por Einstein y Bohr. (No se habla aquí de Heisenberg porque su famoso principio de incertidumbre se deja para la segunda parte.) La mayor parte de esta primera sección se dedica a describir las aplicaciones más importantes de las ideas cuánticas, no solo en aspectos relacionados con la física, sino también con la química y la biología. Así, tras una breve y precisa exposición de la importancia de la mecánica cuántica en el estudio de la estructura atómica y molecular, se presentan dos ejemplos, en mi opinión muy bien escogidos, de su aplicación al enlace químico: la «física cuántica del agua» y la «química cuántica del carbono» (así llamadas en el libro); en ambos resulta notable la conjunción de brevedad y claridad, en particular en la descripción de las peculiares propiedades de la molécula del agua y de la interacción entre las moléculas (puentes de hidrógeno) de esta sustancia fundamental para la vida.

El siguiente capítulo trata de física nuclear; se introducen las dos interacciones básicas: la fuerte, que da cuenta de la cohesión del núcleo atómico al actuar sobre protones y neutrones, y la débil, responsable de la emisión de rayos beta (electrones o positrones) por algunos núcleos inestables. Por cierto, hay un error en este apartado que, aunque no afecte prácticamente al contenido, sí creo debe señalarse. En la página 68, al hablar de la primera teoría de la interacción fuerte, debida al físico japonés Hideki Yukawa en 1935, y en la que se postula la existencia de los piones —este nombre lo recibieron después— como transmisores de dicha interacción (en evidente analogía con el fotón, que transmite la interacción electromagnética), se dice que estos fueron descubiertos en 1937, cuando en realidad lo fueron en 1947 por Powell y sus colaboradores en Bristol (Inglaterra). Esta inexactitud no tendría mayor importancia si no fuera porque lo que realmente se descubrió en 1937 (más precisamente, a finales de 1936, por Anderson, que había descubierto el positrón en 1932) fue el muon o mesón mu. Este hallazgo causó cierto revuelo porque se creía que se trataba de los piones postulados por Yukawa, pero no era así, y hubo que esperar a 1947 cuando se observó que el muon era realmente un producto de la desintegración de otra partícula mucho más efímera, el pion, este sí la partícula de Yukawa. (En el libro se hace notar adecuadamente que el pion no es realmente una partícula elemental, ya que se compone de un par quark-antiquark, mientras que sí lo es el muon.) Cerrando este capítulo se tratan la fisión nuclear y la fusión nuclear; la primera, desde hace tiempo de gran interés práctico —para bien y para mal— y la segunda, previsible fuente de energía limpia y abundante en un futuro esperemos no muy lejano.

En el siguiente capítulo, el quinto, se penetra en el corazón mismo de la materia abordándose la física de las partículas elementales y sus interacciones. Lógicamente, habida cuenta del espacio disponible y del carácter divulgativo del libro, no puede esperarse gran profundidad, pero la descripción que se presenta es cuidadosa e informativa.

La primera parte del libro concluye con cinco capítulos de carácter más aplicado. Se pasa revista a la electrónica cuántica; la teoría cuántica del magnetismo y sus aplicaciones en la resonancia magnética

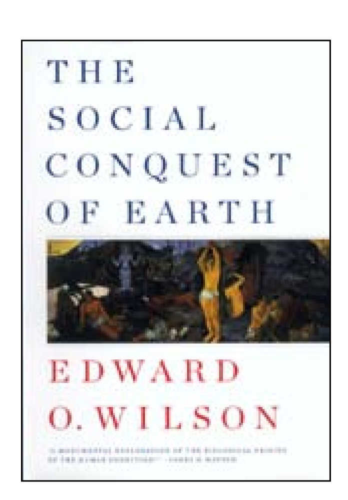
nuclear, las memorias magnéticas y la espintrónica; la óptica cuántica, yendo del láser a la optoelectrónica; la superconductividad y la superfluidez, con sus aplicaciones; y finalmente las bases físico-cuánticas de la vida y, en particular, su posible relevancia en el funcionamiento del cerebro. Este bloque de cinco capítulos es, en mi opinión, lo mejor del libro. El autor ha sido capaz de condensar en algo más de sesenta páginas prácticamente todas las aplicaciones relevantes de la mecánica cuántica sin que esta condensación merme en absoluto la claridad expositiva.

La segunda parte está dedicada a los aspectos más conceptuales de la mecánica cuántica, bajo el título «Las perplejidades de la física cuántica: la sorpresa del mundo». En ella se presenta una descripción bastante ajustada de las cuestiones más relevantes de la fundamentación de la teoría cuántica: complementariedad, indeterminismo (principio de Heisenberg), entrelazamiento, desigualdades de Bell... Además, se hace ver que estas cuestiones, lejos de ser meramente académicas, han sido decisivas en el nacimiento de la importante área de la información cuántica, mostrando como ejemplo de aplicación de esta la computación cuántica, así como, muy sucintamente, la teleportación y la criptografía cuántica. Hay, asimismo, un capítulo, el 16, oportunamente dedicado a la formulación de Feynman (suma sobre caminos o integral de camino) de la mecánica cuántica, que de alguna manera proporciona la base de la llamada formulación de historias consistentes decoherentes, una versión moderna «corregida y ampliada» de la interpretación de los muchos universos, usada mayoritariamente en cosmología cuántica. Y precisamente a esta se dedica el penúltimo capítulo del libro, «Universo. Física cuántica y cosmología», que mantiene la línea de concisión y claridad presentes a lo largo de toda la obra.

Mención aparte merece el último capítulo (antes de la conclusión y un útil glosario), que está dedicado a «la física cuántica como inspiradora del arte y la literatura; como supuesta indagadora de la consciencia y la libertad; o como campo de apertura hacia la mística y la religiosidad», difícil empeño que se satisface muy aceptablemente. Se incluyen en este capítulo dos poemas relacionados de alguna manera con la física cuántica: el primero debido al autor del libro, que, además de reconocido científico, es un notable poeta en catalán; está traducido de esta lengua al castellano y se titula «Dualidad onda-corpúsculo», perteneciente al libro *Las escrituras del universo* (2005); el segundo es del libro *El canto cósmico*, de Ernesto Cardenal, y se titula justamente «Cántico cuántico». Simpático —y algo más— detalle el hacer esta excursión al campo de las humanidades desde la perspectiva de la física cuántica.

En resumen, un libro muy bien escrito y con una amplia información sobre los fundamentos y aplicaciones de la mecánica cuántica que considero de interés general, pues al no incluir apenas tecnicismos resulta muy asequible a personas no expertas en esta disciplina.

—José L. Sánchez Gómez
Universidad Autónoma de Madrid



THE SOCIAL CONQUEST OF EARTH,
por Edward O. Wilson. Liveright Publishing Corporation. Nueva York, 2012.

Condición humana

Una nueva visión sobre la evolución y naturaleza del hombre

Nadie cuestiona la capacidad de Edward O. Wilson por abordar, e iluminar, las cuestiones centrales del mundo orgánico, con el hombre en su epicentro. De sus numerosas obras de fuste (*On human nature, The ants, Sociobiology: The new synthesis*, etcétera) esta viene a ser un compendio y un proyecto de trabajo. En ciencia experimental todo está abierto y la perspectiva de lo alcanzado no es más que punto de arranque para abordar la investigación subsiguiente. Aquí es la biología entera la que se somete a criba a través de un enfoque que diríase apendicular y un tanto paradójico: la explicación del hombre mediante su comparación con especies sociales de invertebrados.

Introduce al lector en la cuestión abriendo un capítulo sobre Paul Gauguin y uno de sus cuadros más famosos, para demostrar que las preguntas fundamentales de los hombres de todos los tiempos (¿de dónde venimos?, ¿a dónde vamos?, ¿qué somos?) no pueden responderse satisfactoriamente desde la filosofía, sino que requieren un estudio científico riguroso. El origen del hombre moderno, sostiene Wilson, «fue un golpe de fortuna dispar, buena para nuestra especie un instante, mala para el resto de la vida para siempre». (Sabidas son sus preocupaciones por el futuro de la biodiversidad y de la misma vida en el planeta, expresadas en *The diversity of life* y *The creation*.) La selección de grupo constituye para el autor el único modelo capaz de explicar la aparición y predominio del hombre.

En 1897, en Panaauia, no lejos del puerto tahitiano de Papeete, Gauguin preparó el caballete para plasmar sobre lienzo una inquietud que le atenazaba. Debilitado por la sífilis, arruinado en lo económico y hundido por la muerte reciente de su hija Aline, consciente de que su vida llegaba a su fin, quería que ese cuadro fuera el último. Cuando lo terminó, subió a la montaña decidido a suicidarse. Dudó a última hora y la sífilis acabó con él, dos años después. Gauguin se había propuesto reflejar en la pintura su concepción de la condición humana. Mirada con detenimiento, observamos una fila de figuras con un fondo de paisajes de Tahití. La mayoría de los personajes son mujeres, que representan el ciclo biológico de la vida humana: un infante a la derecha; un adulto de sexualidad ambigua en el centro, con los brazos alzados, símbolo del autorreconocimiento; hacia la izquierda, una pareja joven que recoge y come manzanas son el arquetipo Adán y Eva en búsqueda de conocimiento; y en el extremo izquierdo,

la muerte, una anciana que se debate en desesperación y se supone inspirada en *Melancholia,* grabado realizado por Alberto Durero en 1514. En el extremo superior izquierdo del cuadro escribió su título famoso: *D'où venons nous / Que sommes nous / Où allons nous?*

En una generación, espera Wilson, conoceremos la base física de la consciencia. Pero ni siquiera entonces sabremos qué somos ni de dónde venimos. Habrá antes que dar respuesta a dos cuestiones básicas: por qué existe la vida social y cuáles fueron las fuerzas motoras que la trajeron a la existencia. Daremos una explicación si sabemos conjugar la información procedente de la genética molecular, la neurociencia, la biología evolutiva, la ecología, la psicología social e incluso la arqueología e historia. Y tomar como punto de comparación otros conquistadores sociales de la Tierra: hormigas, abejas, avispas y termes. No sería la primera vez que metodológicamente procediéramos así. Los biólogos han recurrido con éxito a las bacterias y levaduras para desentrañar los principios de la genética molecular humana. Nos hemos apoyado en gusanos y moluscos para conocer las bases de nuestra organización neural y memoria. Las moscas del vinagre nos han enseñado muchísimo sobre el desarrollo embrionario de nuestra especie. No hemos aprendido menos de los insectos sociales para conocer mejor el origen y el significado de la humanidad.

En el hombre se culmina una epopeya evolutiva que se representó con gran peligro y sin solución de continuidad. En la mayor parte del tiempo implicado, las poblaciones precursoras eran de talla pequeña, de un tamaño que, en el curso de la historia de los mamíferos, significaba extinción precoz. Todas las bandas prehumanas, tomadas en conjunto, no sumaban más allá de unas decenas de miles de individuos. En fecha muy temprana, los ancestros prehumanos se dividieron en dos o más. Por entonces, la vida media de una especie de mamífero era de medio millón de años. Por eso se extinguieron la mayoría de las líneas colaterales prehumanas. La que estaba destinada a dar origen al hombre moderno se expuso a la extinción muchas veces en el último medio millón de años. Pudiera haber bastado una sequía dura en un tiempo y lugar inapropiados, una epidemia o la presión de otros primates competidores. La evolución de la biosfera no hubiera dado marcha atrás para ofrecernos una nueva oportunidad.

En el Eoceno tardío, hace unos 35 millones de años, aparecieron los primeros Catarrinos; algunas especies que dieron origen a los monos del Viejo Mundo, primates y humanos. Hace unos 30 millones de años, los antepasados de los monos del Viejo Mundo divergieron evolutivamente de primates y humanos. Durante los seis millones de años transcurridos desde la divergencia chimpancé-prehumano hasta la aparición de *Homo sapiens* se precipitaron muchos acontecimientos que culminaron en la salida de África. Hace dos millones de años, primates homínidos cruzaron el suelo africano a zancadas. Lograron una radiación adaptativa en la que múltiples especies coexistieron en el tiempo y se solaparon al menos parcialmente en sus respectivos dominios geográficos. Dos o tres eran australopitecinos y por lo menos tres diferían lo bastante en el tamaño del cerebro y en la dentición como para merecer su adscripción al género *Homo*. Todas esas especies vivían en un mundo interrelacionado de sabana, bosque de sabana y bosque de ribera. Los australopitecinos eran vegetarianos. Las especies del género *Homo* recogían y consumían alimentos vegetales; pero también comían carne, de preferencia restos de grandes presas matadas por otros depredadores, aunque también cazaban pequeños animales que podían gestionar por sí mismos. Ese cambio entró de forma exclusiva en el laberinto evolutivo y marcó todas las diferencias.

A medida que los glaciares continentales avanzaban hacia el sur a través de Eurasia, África sufrió un período prolongado de sequía y enfriamiento. Buena parte del continente estaba cubierta de pradera árida y desierto. En ese tiempo de estrés, la muerte de unos cuantos miles de individuos, quizá solo de unos cientos, podría haber cortado la línea que conducía a *Homo sapiens*. Aisladas en África mientras los neandertales vivían todavía, había estirpes arcaicas de *Homo sapiens*, cuyos descendientes iban a propagarse de una manera explosiva fuera del continente. Poblaron el Viejo Mundo, hallaron el camino de Australia y arribaron hasta el Nuevo Mundo y Oceanía. Sustituyeron a las poblaciones existentes de neandertales hace unos 20.000 años.

Homo neanderthalensis medró en Europa y el Levante. Omnívoros como nuestros antepasados, los neandertales tenían estructuras óseas macizas y un cerebro mayor que el del *Homo sapiens* moderno. Emplearon útiles de piedra muy bastos, aunque especializados. La mayoría de sus poblaciones se adaptaron a los duros climas de la estepa de mamuts. Conocidos solo a través de unos cuantos fragmentos óseos, los denisovanes fueron especie vicaria de los neandertales que vivieron en Oriente.

Los neandertales desaparecieron hace unos 30.000 años, ya fuera por competencia por el espacio y el alimento, por matanza directa o por ambos con nuestros antepasados.

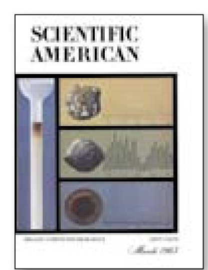
Hace solo 10.000 años se inventó la agricultura, un proceso que se iteró de forma independiente al menos en ocho ocasiones en el Nuevo y Viejo Mundo. Su adopción incrementó drásticamente el suministro de alimentos y, con ello, la densidad de población. Ese avance decisivo permitió un crecimiento exponencial de la población y la transformación del entorno natural en unos ecosistemas muy simples.

Homo sapiens es un animal eusocial, condición que alcanzaron nuestros antepasados prehumanos para establecer alianzas. La vía hacia la eusocialidad vino marcada por un compromiso entre la selección basada en el éxito relativo de los individuos dentro de los grupos y la basada en el éxito relativo entre grupos, una mezcla compleja y sutilmente calibrada de altruismo, cooperación, compensación, dominio, reciprocidad, defección y engaño. Para participar en el juego, fue necesario que las poblaciones adquiriesen en el curso evolutivo un grado cada vez mayor de inteligencia. Tenían que sentir empatía con los otros, medir las emociones de amigo y enemigo por igual, juzgar las intenciones de todos y planificar una estrategia para las interacciones sociales. El cerebro debía construir rápidamente escenarios mentales de relaciones personales, a corto y a largo plazo. Sus recuerdos tenían que viajar en el pasado para rememorar escenarios y en el futuro distante para imaginar las consecuencias de cada relación. Operando en planes alternativos de acción se hallaba la amígdala y otros centros del cerebro y del sistema nervioso autónomo controladores de las emociones. Así nació la condición humana, egoísta unas veces, altruista otras, dos impulsos casi siempre en conflicto.

¿Cómo alcanzó *Homo sapiens* ese lugar único en su travesía a través del enorme laberinto de la evolución? La respuesta es que nuestro destino estaba prefijado por dos propiedades biológicas de nuestros antepasados remotos: talla importante y movilidad limitada.

—Luis Alonso

Recopilación de Daniel C. Schlenoff



Marzo 1963

Tiempos de ansiedad

«Se dice que la nuestra es la era de la ansiedad. Pero ¿qué es la ansiedad y cómo puede medirse? Sigmund Freud escribió mucho sobre ella, pero para su definición se contentó en gran medida con echar mano de la introspección y la semántica. Señaló la clara diferencia que en su lengua natal separa *Furcht* (miedo) de *Angst* (ansiedad), y la mayoría de los psicólogos le siguieron al considerar que la ansiedad es diferente del miedo. Una de las escuelas estadounidenses de teóricos del aprendizaje nos presentaría la ansiedad como el principal agente que mueve a la acción. Casi en el polo opuesto de esa visión de la ansiedad como motor efectivo está el punto de vista clínico sustentado por Frank M. Berger (descubridor de la sustancia que condujo al tranquilizante meprobamato) de que la ansiedad desorganiza la acción efectiva. Afín a esta idea de la desorganización, el punto de vista psicoanalítico sostiene que la ansiedad es el problema nuclear de la neurosis. Para opiniones menos rigurosas, esta idea desemboca a menudo en la de que ansiedad y neurosis son sinónimos, con el resultado de que a las personas con un alto nivel de ansiedad se las trata como neuróticas.

—Raymond B. Cattell»

Policías y ladrones

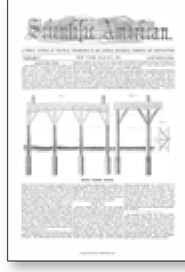
«Hay noticia de un policía de la ciudad de Washington que, aprovechando su experiencia en robos de automóviles, ha inventado un seguro que se instala en el circuito de encendido de los vehículos como una parte más del mismo circuito. Se cuenta que el dispositivo comprende un interruptor eléctrico giratorio combinado con un fiador mecánico. La inserción de una llave distinta a la auténtica impide el funcionamiento del fiador.»



Marzo 1913

Heike Kamerlingh Onnes

«La disminución de la resistencia eléctrica a temperaturas bajísimas, observada no hace mucho por un investigador holandés, ha contribuido en gran medida a confirmar la teoría de que la resistencia de todos los conductores se anularía al enfriarlos hasta el cero absoluto. Lograron llegar a solo tres grados por encima del cero absoluto hirviendo helio en un vacío parcial. A esa temperatura encontraron que la resistencia del mercurio era solo una diezmillonésima de la que tiene a cero grados Celsius.»



Marzo 1863

Globos dirigibles

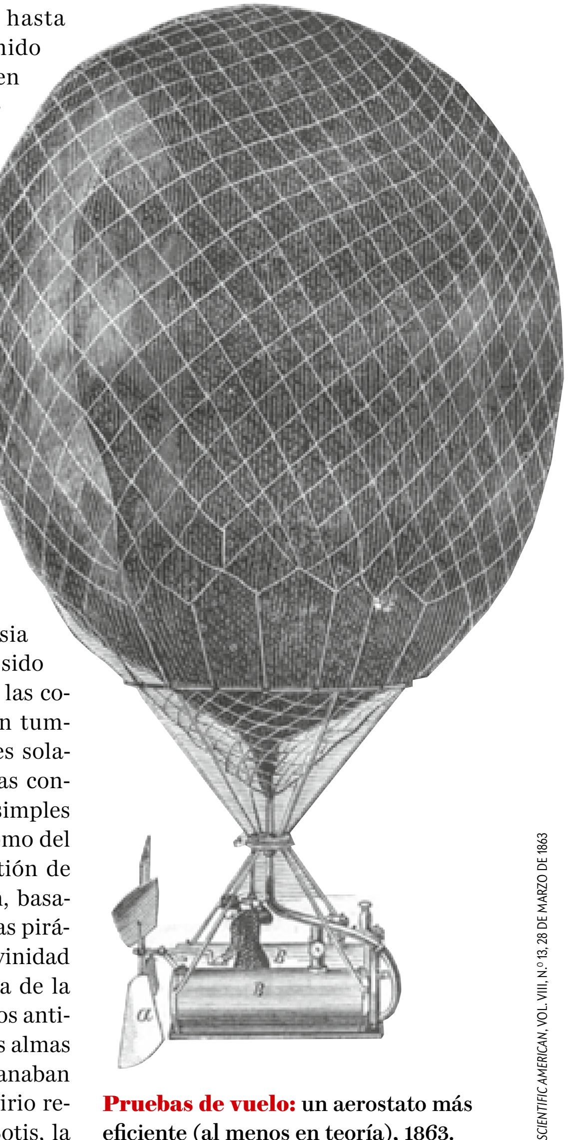
«La única aplicación práctica que hasta ahora han tenido los globos es en las pruebas establecidas por el Gobierno en las operaciones militares para observar las posiciones enemigas. El señor Thomas L. Shaw, del territorio de Nebraska, ha participado en experimentos con máquinas para el transporte y cree haber descubierto un procedimiento para controlar la dirección de los globos y moverlos hacia donde le pete. En el grabado se muestra el mecanismo. La popa del globo lleva una hélice accionada por el aeronauta.»

Astronomía egipcia

«Una materia de gran controversia entre los arqueólogos siempre ha sido el propósito con que se erigieron las colosales pirámides egipcias. ¿Eran tumbas reales, observatorios o relojes solares? ¿Se levantaron como barreras contra las arenas del desierto o eran simples graneros? Mahmoud Bey, astrónomo del virrey de Egipto, explica la cuestión de manera novedosa. En su opinión, basada en observaciones personales, las pirámides estaban dedicadas a una divinidad cuyo símbolo era Sirio, la estrella de la Canícula, la estrella perro. Entre los antiguos egipcios, las estrellas eran las almas de innúmeras divinidades que emanaban de Ammon Ra, el Ser Supremo. Sirio representaba al can de los cielos, Sotis, la jueza de los muertos, por lo que era perfectamente lógico que las pirámides, en su condición de tumbas, estuvieran dedicadas a la estrella Sirio.»

Clases trabajadoras

«Son tantas las horas de trabajo que exigen algunas de las compañías de ferrocarriles de Brooklin y tan duro el trabajo que asombra que los trabajadores puedan ejecutar su labor y seguir vivos. La Brooklyn Central Railroad Company impone una jornada laboral de diecisiete horas y media sin tiempo para comidas; los alimentos necesarios al sustento se ingieren en los coches. La retribución diaria de cobradores y conductores es de 1,35 dólares.»



Pruebas de vuelo: un aerostato más eficiente (al menos en teoría), 1863.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. VIII, N.º 13, 28 DE MARZO DE 1863




NEUROCIENCIA

El archivo de la memoria

Rodrigo Quian Quiroga, Itzhak Fried y Christof Koch

Cada concepto, persona o elemento de nuestra vida cotidiana podría tener asignado un grupo de neuronas.



EVOLUCIÓN HUMANA

Una historia intrincada

Katherine Harmon

Nuevos descubrimientos de fósiles complican aún más la identificación de nuestros antepasados más remotos.

ESPACIO

Los secretos de los meteoritos primitivos

Alan E. Rubin

Los análisis microscópicos de condritas, las rocas más antiguas del sistema solar, arrojan luz sobre el aspecto que presentaban nuestras inmediaciones cósmicas poco antes de la formación planetaria.



MEDICINA

El mito de los antioxidantes

Melinda Wenner Moyer

Nuevos experimentos contradicen ideas tan veneradas como que el daño oxidativo provoca el envejecimiento o que las vitaminas podrían preservar nuestra juventud.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Carlo Ferri
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA
Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

SENIOR VICEPRESIDENT AND EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
MANAGING EDITOR, ONLINE Philip M. Yam
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Christine Gorman, Anna Kuchment, Michael Moyer, George Musser, Gary Stix, Kate Wong
ART DIRECTOR Ian Brown
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
VICE PRESIDENT AND ASSOCIATE PUBLISHER, MARKETING AND BUSINESS DEVELOPMENT Michael Voss
ADVISER, PUBLISHING AND BUSINESS DEVELOPMENT Bruce Brandfon

DISTRIBUCIÓN
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Teléfono 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Aptitud Comercial y Comunicación S. L.
Ortigosa, 14
08003 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	65,00 €	100,00 €
Dos años	120,00 €	190,00 €

Ejemplares sueltos: 6,50 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Tanja Sachse: *Efectos cuánticos macroscópicos*; Tomás Ortín: *Fases cuánticas y teoría de cuerdas*; Ana Fernández del Río: *Paradojas colectivas y lógica cuántica*; Alberto Ramos: *El cuanto no cuántico*; Juan Pedro Adrados: *La humanidad en el espacio*; Sara Arganda: *Conexiones biónicas*; Luis Bou: *El clip sujetapapeles, Risa de rata y Dependencia y cooperación entre los sentidos*; Andrés Martínez: *Maravillas diminutas*; Bruno Moreno: *Apuntes y ¿Están sanos los océanos?* Raquel Santamarta: *Curiosidades de la física*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN 0210136X Dep. legal: B-38.999-76

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. N-II, km 600
08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España